
WHITE - Winter Hazards in
Terminal Environment:
Entwicklung eines
Nowcasting-Systems zur
Vorhersage von Winterwetter am
Flughafen München

Felix Keis



München 2014

**WHITE - Winter Hazards in
Terminal Environment:
Entwicklung eines
Nowcasting-Systems zur
Vorhersage von Winterwetter am
Flughafen München**

Felix Keis

Dissertation
an der Fakultät für Physik
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt von
Felix Keis
aus Tirschenreuth

München, den 25.09.2014

Erstgutachter: Prof. Dr. G. Craig

Zweitgutachter: Prof. Dr. M. Rapp

Tag der mündlichen Prüfung: 23.03.2015

Zusammenfassung

Flughäfen werden durch winterliche Wetterbedingungen maßgeblich beeinflusst. Schnee oder Eis auf Bewegungsflächen und Flugzeugen behindern, verzögern und gefährden den alltäglichen Ablauf und erfordern eine rechtzeitige Durchführung von Gegenmaßnahmen. Die exakte Erfassung und Vorhersage von Winterwetterverhältnissen sind die entscheidenden Faktoren, um Pünktlichkeit, Effizienz und Sicherheit in Winterwettersituationen am Flughafen aufrecht zu erhalten und den ökonomischen Schaden zu minimieren.

In Zusammenarbeit mit dem Flughafen München wurde in der Abteilung Verkehrsmeteorologie des DLR-Instituts für Physik der Atmosphäre das Winterwetter-Nowcasting-System WHITE (Winter Hazards in Terminal Environment) entwickelt. WHITE ist ein automatisiertes System, das mehrere Datenquellen miteinander verbindet, um problematische Winterszenarien, wie Schnee, gefrierenden Niederschlag oder Vereisung, zu identifizieren. Dabei wird ein Ansatz gewählt, der die entscheidenden Parameter unterschiedlicher Szenarien anhand einer innovativen Fuzzy-Logik verknüpft und potentiell gefährliche Regionen klassifiziert. Diese gefährlichen Regionen werden anschließend zu Winterwetterobjekten zusammengefasst. So können sowohl der Niederschlagstyp als auch die Intensität des Winterwetters bestimmt werden. Da neben der Situationsanalyse in WHITE auch eine kurzfristige Vorhersage für maximal zwei Stunden erstellt wird, kann zudem eine Aussage über den Beginn und die Dauer problematischer Situationen getroffen werden.

WHITE besitzt neben dem Nowcasting-System mit einem Participatory-Sensing-Ansatz ein weiteres Hauptelement. Dieser Ansatz nutzt die Fähigkeiten der Positionsbestimmung internetfähiger Mobilgeräte in Kombination mit der allgegenwärtigen Bereitschaft zur regelmäßigen Nutzung dieser Geräte. Dadurch werden Möglichkeiten eröffnet, die von der Optimierung der Leistungsfähigkeit und der Evaluierung bis hin zum erleichterten Umgang der Nutzer mit den Ergebnissen des Nowcasting-Systems reichen.

In dieser Arbeit werden die Grundlagen, die Datenquellen und die Entwicklung des Nowcasting-Systems und des Participatory-Sensing-Ansatzes beschrieben. Zusätzlich werden die Ergebnisse zweier Testkampagnen in den Wintermonaten 2012/2013 und 2013/2014 gezeigt und die Leistungsfähigkeit des Systems anhand exemplarischer Fallstudien demonstriert.

Abstract

Winter weather is a decisive factor affecting the daily course of action at airports and causing delays or even safety hazards. Snow covered or iced aerodrome movement areas or aircraft require an initiation of counteractions on time. In order to minimize economic loss and to maintain safety, winter weather situations within an investigation area around an airport have to be detected and forecasted as precisely as possible.

At the Department of Traffic Meteorology of the German Aerospace Center's (DLR) Institute of Atmospheric Physics the winter weather nowcasting system WHITE (Winter Hazards In Terminal Environment) has been developed kindly supported by Munich Airport operations. Designed as an automated system WHITE assimilates multiple real-time data sources and assesses problematic winter weather aspects like the differentiation between snow and liquid precipitation, the identification of freezing precipitation and icing plus the rating of surface conditions. The innovative approach of WHITE, combining critical parameters for different predefined winter weather scenarios by means of Fuzzy Logic, classifying hazardous regions and generating winter weather objects, enables the determination of precipitation type and hazard's intensity. By nowcasting the current situation over a period of two hours it is also possible to estimate the beginning and the duration of hazardous conditions within the investigation area.

In addition to the nowcasting system a participatory sensing approach is integrated within WHITE as a second main issue. The idea of this user-centered approach is based on the recent spread of high-capacity sensor-equipped mobile phones and the pervasive willingness of using the devices. Performance optimization, output evaluation and simplified handling with the system's output are the benefits resulting from the participatory sensing approach.

In this work the basics, the data sources and development of the nowcasting system and of the participatory sensing approach are described. Additionally the results of two test campaigns during the winter months of 2012/2013 and 2013/2014 are shown and the system's capability is demonstrated with the help of significant case studies.

Inhaltsverzeichnis

I	Einleitung	1
II	Meteorologische Grundlagen	5
II.1	Die Entstehung von Wolkentröpfchen	5
II.2	Die Entstehung von Eispartikel und unterkühltem Flüssigwasser . .	9
II.3	Wachstum der Wolkenelemente und Entstehung von Niederschlag .	11
II.4	Niederschlagsbildende Prozesse in winterlichen Wettersituationen .	14
II.4.1	Schnee - Mischniederschlag - Regen	16
II.4.2	Gefrierender Regen - Eisregen/Eiskörner - Regen	18
II.4.3	Gefrierender Niesel - Vereisung in Wolken	19
II.5	Problematik der Winterwetterszenarien für Flughäfen	21
II.5.1	Kontamination der Bewegungsflächen mit Schnee oder Eis .	21
II.5.2	Kontamination der Flugzeuge mit Schnee oder Eis	22
II.5.3	Sichtverhältnisse	26
III	Winterwetter am Flughafen München	27
III.1	Die Winter der letzten Jahre am Flughafen München	28
III.2	Strategie gegen winterliche Flächenkontaminationen	31
III.3	Strategie gegen Flugzeugvereisung	35
IV	Das WHITE-System	37
IV.1	Winterwetterforschung am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre	37
IV.1.1	Beobachtungsinstrumente	38
IV.1.1.1	Mikro-Regen-Radar 2 (MRR-2)	38
IV.1.1.2	Parsivel	39
IV.1.1.3	POLDIRAD	39
IV.1.2	Vereisungsforschung am DLR	40
IV.1.2.1	ADWICE	40
IV.1.3	Fuzzy-Logik und Wetterobjekte	41
IV.2	Winterwetterforschung in der internationalen Fachliteratur	42
IV.3	Das Nowcasting-System von WHITE	46
IV.3.1	Modul 1: Datenquellen	46
IV.3.1.1	Beobachtungs- und Messstationen im Untersuchungs- gebiet	47

IV.3.1.2	COSMO-DE	49
IV.3.1.3	Radar-Komposit RX	50
IV.3.2	Modul 2: Präprozessierung und Nowcasting der Daten	51
IV.3.2.1	Modellprognosen und Beobachtungsdaten	52
IV.3.2.2	Radardaten	58
IV.3.3	Modul 3: Die Winterwetterszenarien in WHITE	62
IV.3.3.1	Die Winterwetterszenarien und das vertikale Wetterobjekt	62
IV.3.3.2	Die Entwicklung der Fuzzy-Sets	70
IV.3.3.3	Klassifikation der Szenarien	87
IV.3.4	Modul 4: Zusammenfassung zu Objekten durch Bilddatenverarbeitung	90
IV.3.5	Modul 5: Szenario-Korrektur	92
IV.3.6	Die Ausgabe des WHITE-Systems	94
IV.3.6.1	Grafische Ausgabe	95
IV.3.6.2	XML-Ausgabe	96
IV.4	Das Participatory-Sensing-Konzept von WHITE	97
IV.4.1	Der Hintergrund des Participatory-Sensing-Konzepts	97
IV.4.2	WRAP - Weather Report Application	101
IV.4.2.1	Die Standard-Web-Applikation (DCP WRAP)	102
IV.4.2.2	Die mobile Applikation (mobile WRAP)	102
IV.4.2.3	Die Kommunikation zwischen WRAP und dem Nowcasting-System von WHITE	104
IV.5	Die DLR-Winterwetterkampagnen - WHITE im quasioperationellen Testbetrieb	106
IV.5.1	Die Organisation und der Ablauf der Kampagnen	106
IV.5.2	Evaluierung der gesammelten Daten	109
IV.5.2.1	Beurteilung des Erfolgs des Participatory-Sensing-Ansatzes	112
IV.5.2.2	Statistische Verifikation des Nowcasting-Systems	115
IV.5.2.3	Fallstudien von WHITE	119
V	Fazit und Ausblick	129
V.1	Diskussion der Ergebnisse	130
V.2	Ausblick	133
A	Anhang	137
	Abbildungsverzeichnis	148
	Tabellenverzeichnis	149
	Literatur	150

I. Einleitung

Skifahren auf einer perfekt präparierten Piste - Eislaufen auf einem zugefrorenen See - eine Schneeballschlacht inmitten verschneiter Landschaften. Solche Bilder führt man sich gerne vor Augen, wenn man sich den Winter vergegenwärtigt. Doch zum Inventar eines Wintertages gehören neben diesen angenehmen Attributen auch weitere, weniger erfreuliche Charakteristika. Die morgendliche Befreiung des Autos von Schnee und Eis, der Kampf mit den Schneemassen vor der Haustür oder der verzweifelte Versuch allen Schneematschpfützen auf seinem Weg auszuweichen, sind nur einige Beispiele dafür, wie sich Winterwetter negativ auf unseren Alltag auswirken kann. Neben diesen kleinen unerfreulichen Konsequenzen resultieren auch folgenschwere Auswirkungen im Straßen- und Luftverkehr aus winterlichen Wetterbedingungen. Beispielsweise beeinträchtigen verschneite oder vereiste Verkehrswege regelmäßig den Straßenverkehr in Bezug auf Pünktlichkeit, Effizienz und Sicherheit. Auch Flughäfen und der Luftverkehr im Allgemeinen werden durch winterliche Wetterbedingungen maßgeblich beeinflusst. Schnee oder Eis auf den Bewegungsflächen und Flugzeugen behindern, verzögern und gefährden den alltäglichen Ablauf. Neben den offenkundigen Behinderungen durch schneebedeckte Start- und Landebahnen sowie Sichteinschränkungen aufgrund von Schneefall oder Nebel, ist die Vereisung ein typisches Phänomen des Winterwetters. Sie tritt sowohl am Boden, auf Straßen und Landebahnen als auch an parkenden (Luft-) Fahrzeugen auf. Eine besonders gefährliche Form der Vereisung ist die Vereisung in Verbindung mit sogenannten großen unterkühlten Tropfen (SLD: supercooled large drops). Diese SLD können durch unterschiedliche Prozesse entstehen und beispielsweise in Form von gefrierenden Niederschlägen oder Vereisung in Wolken auftreten. Im Hinblick auf den Luftverkehr können diese SLD zu prekären Situationen führen, da sogar ein Eisansatz während des Fluges möglich ist. Das kann vor allem bei kleineren Maschinen die Strömungs- und Gewichtsverhältnisse signifikant modifizieren und unter Umständen sogar zum Strömungsabriss führen.

An- und Abflüge an Flughäfen sind einem straffen Zeitplan unterworfen. Die Verspätung einzelner oder weniger Flüge zieht stets eine Umstrukturierung des kompletten Flughafenablaufs nach sich. Flugzeuge müssen sich in Warteschleifen begeben oder auf ihre Lande- beziehungsweise Starterlaubnis warten. In besonders schwierigen oder gefährlichen Winterwettersituationen am Flughafen müssen Flüge auf andere Flughäfen ausweichen oder sie werden ganz gestrichen. Die außerplanmäßigen 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 für den weiteren Verlauf des Tages und muss daher bestmöglich vermieden werden. Die exakte Erfassung und Vorhersage von Winterwetterverhältnissen sind die entscheidenden Faktoren, um Pünktlichkeit, Effizienz und Sicherheit in Winterwettersituationen am Flughafen aufrecht zu erhalten und den ökonomischen Schaden zu minimieren. Im Klartext bedeutet das, die Winterwetterverhältnisse in der Terminal Manoeuvring Area (TMA) des Flughafens so präzise wie möglich zu erfassen und vorherzusagen. Vor allem der exakte zeitliche Ablauf sowie die Beschaffenheit und Intensität eines Winterwetterszenarios sind für die Flughafenbetreiber oder Straßenbetriebsdienste elementare Informationen. Exakte und zutreffende Vorhersagen sind nötig, um entsprechende Gegenmaßnahmen bereits im Vorfeld einleiten zu können und nicht im Nachhinein auf die problematischen Bedingungen reagieren zu müssen. Nur so kann zum Beispiel die Räumung von Landebahnen und Zufahrtswegen sowie die Enteisierung von Flugzeugen vor dem Start rechtzeitig organisiert und in die Wege geleitet werden. Und nur so lassen sich die ebenfalls kostspielige und überflüssige Alarmierung von Personal sowie die Bereitstellung von Ausrüstung und Maschinen vermeiden. Eine Befragung an der Verkehrsleitzentrale am Münchner Flughafen ergab als entscheidende Fragestellungen in Winterwettersituationen (Tafferner & Keis, 2012):

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

Weitere wichtige Punkte für die 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,
- Sichtverhältnissen.

Die vorliegende Arbeit hat das wissenschaftliche Ziel, die Anwendung von Fuzzy-Logik bei der Kombination von in Echtzeit verfügbaren Daten zu untersuchen und dadurch ein Nowcasting von Winterwetterbedingungen für den Flughafen München zu ermöglichen. Die in Echtzeit verfügbaren Daten für die Arbeit sind die

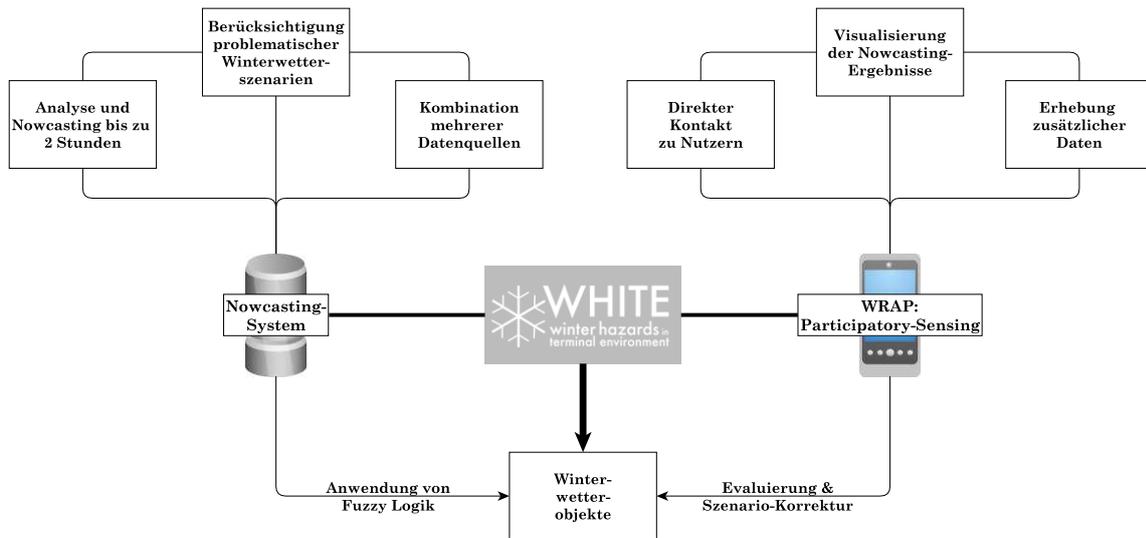


Abbildung I.1.: Schematische Darstellung des WHITE-Systems

Prognosen des numerischen Wettervorhersagemodells COSMO-DE, die regelmäßigen Beobachtungen der SYNOP und SWIS Stationen sowie die Messungen des deutschlandweiten Radarkomposit RX. Um das Ziel zu erreichen und um problematische Winterwetterbedingungen detektieren und vorhersagen zu können, wurde mit der vorliegenden Arbeit das Winterwetter-Nowcasting-System WHITE (Winter Hazards in Terminal Environment) entwickelt. WHITE ist ein automatisiertes System, das auf Grundlage der verfügbaren Datenquellen Winterszenarien wie Schnee, Mischniederschlag, gefrierenden Niederschlag, Eisregen oder Vereisung in Wolken mit SLD identifiziert und in einem kurzfristigen Zeitrahmen prognostiziert. Dabei wird ein Ansatz gewählt, der die entscheidenden Parameter innerhalb der einzelnen Szenarien anhand einer innovativen Fuzzy-Logik verknüpft und potentiell gefährliche Regionen klassifiziert. Diese gefährlichen Regionen werden anschließend zu anschaulichen Winterwetterobjekten zusammengefasst. Neben einer Situationsanalyse wird außerdem eine kurzfristige Vorhersage für die folgenden zwei Stunden berechnet. So können sowohl der Niederschlagstyp als auch die Intensität, der Auftakt und die Dauer des Winterwetters bestimmt werden.

Die meteorologischen Grundlagen der WHITE-Algorithmen werden ausführlich beschrieben in Kapitel II. Die Entwicklung und die Implementierung des Nowcasting-Systems können in Kapitel IV.3 gefunden werden. Kapitel III beinhaltet den Einfluss von Winterwettersituationen auf den Flughafen München und erläutert, wie dort mit entsprechenden Situationen umgegangen wird. Um die vorliegende Arbeit in einem größeren Kontext einordnen zu können und um die Grundideen von WHITE zu verdeutlichen wird in den Kapiteln IV.1 und IV.2 ein Überblick über vergleichbare Literatur und inspirierende Arbeiten sowohl am DLR als auch im internationalen Umfeld präsentiert.

WHITE besitzt neben dem Nowcasting-System mit einem Participatory-Sensing-Ansatz ein weiteres Hauptelement. Abbildung I.1 zeigt die schematische Struktur des WHITE-Systems mit seinen zwei Hauptelementen und deren wichtigsten Attributen. Der Participatory-Sensing-Ansatz nutzt die Fähigkeiten der Positionsbestimmung internetfähiger Mobilgeräte in Kombination mit der allgegenwärtigen Bereitschaft zur regelmäßigen Nutzung dieser Geräte. Dadurch werden Möglichkeiten eröffnet, die von der Erschließung einer zusätzlichen Datenquelle über die Optimierung der Leistungsfähigkeit und der Evaluierung der Algorithmen bis hin zum erleichterten Umgang der Nutzer mit den Ergebnissen des Nowcasting-Systems reichen. In WHITE ist der Ansatz realisiert durch die Entwicklung der plattformunabhängigen Web-Applikation WRAP (Weather Report Application), mit der die Nutzer ohne großen Aufwand jederzeit und von überall durch ihre Mobilgeräte Wetterbeobachtungen übermitteln können. Dieser Participatory-Sensing-Ansatz, seine Berührungspunkte in der internationalen Fachliteratur sowie die Entwicklung und die technische Grundstruktur der Web-Applikation werden ausführlich erörtert in Kapitel IV.4.

In den Wintermonaten 2012/2013 und 2013/2014 wurden Kampagnen durchgeführt, um WHITE im quasioperationellen Betrieb zu testen. Beteiligt an der Kampagne waren neben dem Institut für Physik der Atmosphäre unter anderem die Verkehrsleitung des Flughafen Münchens, die Deutsche Flugsicherung am Flughafen München und der flugmeteorologische Vorhersagedienst des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen München. In Kapitel IV.5 sind Evaluierungen und Qualitätsanalysen des Nowcasting-Systems sowie eine Beurteilung des Participatory-Sensing-Konzeptes in Bezug auf die beiden Kampagnen dargestellt.

II. Meteorologische Grundlagen

Der Ausdruck Winterwetter ist kein klar definierter Begriff. Er umschreibt die Wetterphänomene Schneefall und gefrierender Niederschlag, aber im allgemeinen Sprachgebrauch oft auch das Ansetzen von Raureif oder Frost. Außerdem wird nicht selten ein Temperatursturz lapidar als Winterwetter bezeichnet. Wie in Kapitel I beschrieben, werden in dieser Arbeit vor allem die für den Verkehr problematischen Wetterszenarien Schnee, gefrierender Niederschlag, Eisregen, Mischniederschlag und Vereisung in Wolken mit großen unterkühlten Tropfen behandelt. Für ein meteorologisches Grundverständnis dieser Prozesse wird im folgenden Kapitel ein Überblick über die wolkenphysikalischen und mesoskaligen Vorgänge in der Atmosphäre vorgestellt.

II.1. Die Entstehung von Wolkentröpfchen

Da Winterwetter sowohl in Verbindung mit flüssigem als auch mit festem Niederschlag auftritt, ist zunächst ein grundlegender Überblick über die Entstehung von Wolken und Niederschlag erforderlich. In der Troposphäre der Erde tritt Wasser in den drei Phasen flüssig, fest und gasförmig auf. Wolken und Niederschlag sind dabei Resultate der Phasentransformationen von Wasser in der unteren Atmosphäre. Die möglichen Übergänge sind in Abbildung II.1 dargestellt. In der Atmosphäre entstehen Wolkentröpfchen und Niederschlag im Wesentlichen nur in Verbindung mit Kondensationskeimen. Versuche unter Laborbedingungen in absolut sauberer Luft zeigen, dass homogene Nukleation erst bei hohen Übersättigungen von rund 800 Prozent relativer Feuchte auftritt (Malberg, 2002). Selbst im Inneren konvektiver Wolken wurden in der Vergangenheit aber nur maximale relative Feuchten von ca. 107 Prozent gemessen (Pruppacher & Klett, 1997). Aus diesem Grund werden in der freien Atmosphäre immer Aerosole zur Tropfenbildung benötigt. Das Aerosolmaterial setzt sich vor allem zusammen aus Staubpartikeln und Salzteilchen, die durch Turbulenz vom Erdboden oder von Meeresoberflächen aufgewirbelt werden, Rußpartikeln und Asche, die durch Waldbrände, Industrie oder Vulkanausbrüche in die Atmosphäre gelangen, und den sogenannten sekundären Partikeln. Sekundäre Partikel sind Aerosole, die durch Phasenumwandlungen gasförmiger Bestandteile der Luft zu kleinen Festkörperpartikeln entstehen. Induziert werden die Phasenumwandlungen von photochemischen oder chemischen Prozessen. Besonders zu erwähnen sind hier Schwefeldioxyde (SO_2), Stickstoffdioxyde (NO_2), ungesättigte

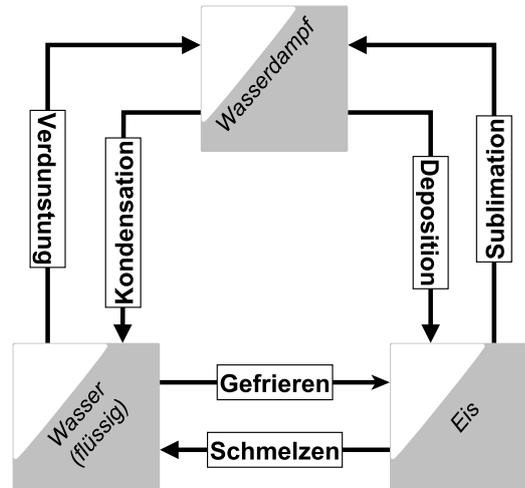


Abbildung II.1.: Phasenübergänge von Wasser

Kohlenwasserstoffe und Ammoniak (NH_3). Neben der Zusammensetzung variiert auch die Form der Aerosole von sphärisch über kristallin bis hin zu agglomeriert. Unabhängig von ihrem Ursprung und ihrer Form sind alle Aerosole kontinuierlichen chemischen und physikalischen Transformationen unterworfen. Dazu gehören Wachstum durch Koagulation und Kondensation aber auch degenerative Prozesse wie Dispersion, Sedimentation oder Auswaschung durch Niederschlagsprozesse. Das führt dazu, dass in der Atmosphäre die Aerosol-Größenverteilung und -konzentration zeitlich und räumlich sehr variabel sind. In Bodennähe und über urbanen Gebieten kann naturgemäß die höchste Konzentration gefunden werden. Mit wachsender vertikaler Distanz von der Erdoberfläche oder mit wachsendem horizontalem Abstand von den Primärquellen nimmt die Aerosol-Konzentration ab. So variiert die Konzentration über dem Festland zwischen 10^3 und 10^5 Partikel/ cm^3 , kann über Großstädten aber auch 10^6 Partikel/ cm^3 betragen. Über den Ozeanen bewegt sich die Aerosolkonzentration zwischen 300 und 600 Partikel/ cm^3 . Die Durchmesser der Partikel variieren zwischen 10^{-2} μm und 10^2 μm . Die kleinsten Partikel mit Größen von 10^{-2} μm bis 10^{-1} μm werden dabei als Aitken-Kerne bezeichnet. Partikel mit einem Durchmesser von 10^{-1} μm bis 2 μm bezeichnet man als große Kerne. Ab einem Durchmesser von 2 μm werden Aerosole als Rieskerne betitelt. Den größten Einfluss auf die Bildung von Wolken haben Aerosole im Größenintervall von 0.1 μm bis 1 μm . Größere Partikel sind meist nur in geringer Anzahl vorhanden, kleinere Partikel benötigen eine zu hohe Sättigung (Rogers & Yau, 1996). Die Begründung dafür findet sich in der physikalischen Tatsache, dass der Sättigungsdampfdruck über ebenen und gekrümmten Flächen unterschiedlich ist. Je kleiner ein Tropfen ist, desto stärker ist seine Oberfläche gekrümmt. Je stärker die Oberfläche gekrümmt ist, desto geringer ist die Bindung der Wassermoleküle innerhalb des Tropfens und desto höher ist der Sättigungsdampfdruck über der gekrümmten Fläche. In der Praxis bedeutet das, dass die in der Atmosphäre leicht übersättigte

Luft über den sehr kleinen Tropfen ungesättigt ist und die Tropfen so unmittelbar nach der Bildung wieder verdunsten (Malberg, 2002). Dieser Krümmungseffekt ist auch ein Grund, warum homogene Nukleation in der Atmosphäre nicht vorkommt. Bei der Bildung der Wolkenröpfchen ohne Kondensationskern sind die Ursprungstropfen zu klein, um den Krümmungseffekt überwinden zu können. Beschrieben werden kann dieser Effekt anhand der Kelvin-Gleichung II.1. Dort und in Abbildung II.2 erkennt man, dass zur Bildung eines kleinen Tropfens eine sehr hohe Übersättigung nötig ist, welche in der Atmosphäre nicht auftritt. Zudem kann mit dieser Gleichung berechnet werden, welcher kritische Radius bei bekannter Übersättigung notwendig ist, damit sich diese embryonalen Tröpfchen zu Wolkentropfen weiterentwickeln können (Pruppacher & Klett, 1997).

$$S = \frac{e_s(r)}{e_s(\infty)} = e^{\frac{2\sigma}{rR_V\rho_L T}} \quad (\text{II.1})$$

mit	$e_s(r)$	Sättigungsdampfdruck über einem Tropfen mit Radius r
	$e_s(\infty)$	Sättigungsdampfdruck über einer ebenen Wasserfläche
	S	Verhältnis von $e_s(r)$ und $e_s(\infty)$
	σ	Oberflächenspannung des Tropfens
	R_V	Gaskonstante für Wasserdampf
	ρ_L	Dichte des Tropfens
	T	Temperatur

Die embryonalen Tröpfchen entstehen, indem sich Wasserdampfmoleküle an den Kondensationskernen ablagern und diese mit einem dünnen Wasserfilm überziehen. Bei entsprechender Größe des Keims ist der Einfluss des Krümmungseffekts also bereits abgeschwächt. Unterstützend beim weiteren Wachstum der Tröpfchen wirkt der Lösungseffekt. Dieser Effekt beschreibt das physikalische Phänomen, dass bei gleicher Oberflächenform der Sättigungsdampfdruck über wässrigen Lösungen geringer ist als über reinem Wasser. In der Atmosphäre existiert eine Vielzahl an wasserlöslichen Aerosolen. Dabei handelt es sich vor allem um Salze oder Säuren, die sich durch kondensiertes Flüssigwasser lösen und die so Tröpfchen aus wässrigen Lösungen entstehen lassen. Je kleiner der Tropfen ist, desto größer ist die Konzentration der Lösung und desto höher ist die relative Übersättigung über dem Tropfen (Wallace & Hobbs, 2006). Beschrieben wird dieser Effekt durch das Raoult'sche Gesetz. Die Kelvin-Gleichung II.1 kann zur Köhler-Gleichung II.2 erweitert werden. Die daraus resultierenden Kurven werden als Köhler-Kurven (siehe Abbildung II.2) bezeichnet (Leifeld, 2004).

$$S = \left[1 - \frac{b}{r^3}\right] e^{\frac{a}{r}} \quad (\text{II.2})$$

mit

$$a = \frac{2\sigma}{R_V\rho_L T}$$

$$b = \frac{3im_v M}{4\pi\rho_L m_s}$$

und i van't Hoff Faktor (Dissoziationsgrad)
 m_v Molare Masse von Wasser
 m_s Molare Masse der gelösten Substanz
 M Masse der gelösten Substanz

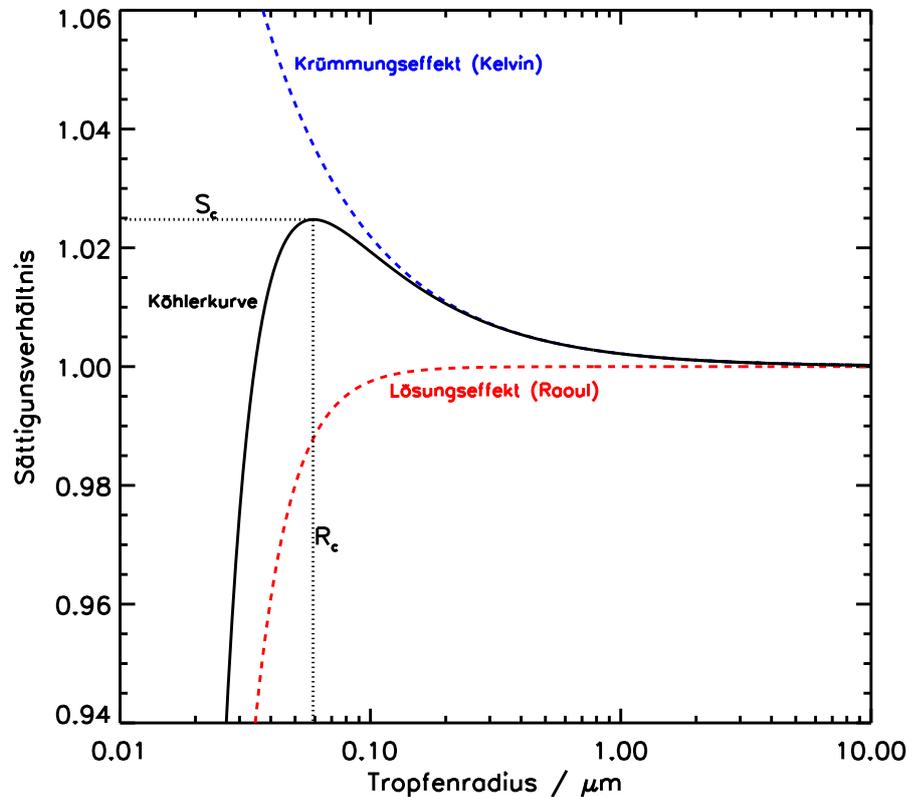


Abbildung II.2.: Köhler-Kurve für einen Tropfen aus wässriger Lösung (schwarze Kurve). Die blau-gestrichelte Kurve zeigt den Einfluss des Krümmungseffekts, die rot-gestrichelte den des Lösungseffekts. R_c ist der kritische Radius, S_c das kritische Sättigungsverhältnis. Grafik nach Rogers & Yau (1996).

Die Kurven zeigen, dass der Sättigungsdampfdruck über sehr kleinen Tropfen im Gleichgewicht mit dem Umgebungsdampfdruck ist. Bei einer Erhöhung oder Erniedrigung der relativen Feuchte wird das Tröpfchen entweder durch Kondensation wachsen oder soweit verdunsten bis sich wieder ein Gleichgewicht eingestellt hat. Wird das kritische Sättigungsverhältnis des Tropfens, welches laut Gleichung II.2 vor allem von der Umgebungstemperatur und der molekularen Zusammensetzung des gequollenen Aerosols abhängig ist, erreicht, oder überschreitet die Tropfengröße den kritischen Radius, stellt sich dieses stabile Gleichgewicht nicht mehr ein. Der Kondensationskern wird dann als aktiviert bezeichnet und wächst auch ohne weitere Erhöhung des Sättigungsverhältnisses zu einem Wolkentropfen an (Rogers & Yau, 1996).

II.2. Die Entstehung von Eispartikel und unterkühltem Flüssigwasser

In den mittleren Breiten liegen die Temperaturen in Wolken häufig unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Unter solchen Bedingungen können Tröpfchen zu Eisteilchen gefrieren und Eiskristalle bilden. Auch die direkte Deposition von Wasserdampf zu Eis wird in der Atmosphäre beobachtet. Beide Vorgänge werden ebenfalls als Nukleation bezeichnet. Analog zum Kondensationsprozess kann auch bei dieser Nukleation zwischen homogener und heterogener Nukleation differenziert werden. Homogene Nukleation beschreibt den Vorgang, wenn reine Wassertropfen zu Eispartikel gefrieren oder wenn Wasserdampfmoleküle direkt in die feste Phase übergehen. Ähnlich wie bei der Bildung von Wassertropfen spielen diese Prozesse in der Troposphäre eine untergeordnete Rolle. So gefrieren reine Wolkentropfen erst bei ca. $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die direkte Deposition erfolgt erst bei sehr hohen Übersättigungen oder bei Temperaturen von unter $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Stevens, 2010). Eine Begründung dafür kann in der Energiebarriere zwischen den beiden Phasen flüssig und fest gefunden werden. Zudem ist der Gefrierpunkt wässriger Lösungen im Vergleich zu reinem Wasser herabgesetzt. Wolkentropfen sind sehr oft wässrige Lösungen und das Auftreten von unterkühltem Wasser ist in Wolken allgegenwärtig. Innerhalb der freien Molekülstruktur der Tropfen können sich durch zufällige Kollisionen sogenannte Cluster aus Wassermolekülen bilden. Diese mikroskopischen Strukturen können als fest angesehen werden, besitzen aber geringe Bindungsenergien und können durch Stöße mit Molekülen höherer thermischer, beziehungsweise kinetischer Energie der Maxwellverteilung wieder aufgebrochen werden. Bei kälteren Temperaturen erhöht sich die statistische Lebensdauer der Cluster, da die kinetische Energie der Moleküle sinkt. Die Anzahl und Größe der anfänglichen Eisstrukturen nimmt also bei tieferen Temperaturen zu. Ein Wolkentropfen gefriert allerdings erst, wenn der so gebildete Eiskeim eine kritische Größe erreicht. Erst dann ist ein weiteres Anwachsen des Clusters energetisch günstiger als sein Zerfall (Wender, 2012). In der unteren Atmosphäre der Erde enthalten Wolken normalerweise aber bereits bei Temperaturen von unter $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ einen beträchtlichen Anteil an Eiskristallen. Unterkühltes Wasser gefriert bei Kontakt mit Oberflächen schon bei deutlich wärmeren Temperaturen als $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und auch die direkte Deposition an Fremdkörpern braucht nicht die gleichen Voraussetzungen wie die homogene Nukleation. Auf der Oberfläche von Aerosolen in der Atmosphäre können sich Wassermoleküle zu eisähnlichen Strukturen anordnen, deren Größe bereits den kritischen Radius überschreitet und für ein weiteres Wachstum ausreicht (Wallace & Hobbs, 2006). Je größer also die Gefrierkerne sind und je ähnlicher die kristalline Struktur des Trägermaterials den Eiskristallen ist, desto geringer können Unterkühlung und Übersättigung im Vergleich zur homogenen Nukleation sein. In den unterkühlten Wolken existiert eine große Anzahl an Aerosolpartikeln. Allerdings ist nur ein Bruchteil davon für die Eisbildung von Bedeutung. Diese Aerosole werden als Gefrierkerne bezeichnet.

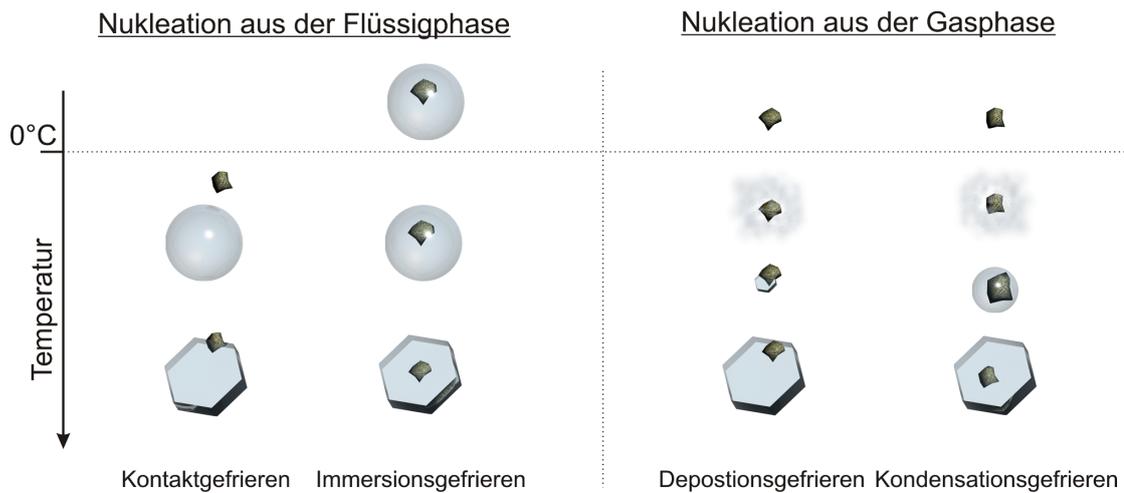


Abbildung II.3.: *Heterogene Gefriermechanismen (Erklärung siehe Text). Grafik aus Wender (2012).*

Wie in Abbildung II.3 illustriert, existieren vier Mechanismen der heterogenen Nukleation. Auch hier kann grundsätzlich zwischen der Nukleation aus der Gasphase durch Deposition freier Wasserdampfmoleküle und der Nukleation aus der Flüssigphase durch Gefrieren unterkühlter Wassertropfen unterschieden werden. In der ersten Variante, dem sogenannten Kontaktgefrieren, erstarrt ein unterkühlter Wassertropfen bei mechanischem Kontakt mit einem Eiskeim. Die zweite Möglichkeit, das Immersionsgefrieren, beschreibt den Vorgang, wenn ein Aerosol in einen bestehenden warmen Tropfen eingebaut und bei weiterer Abkühlung zu einem Gefrierkern aktiviert wird. Das Depositionsgefrieren als dritte Variante beschreibt die direkte Deposition von Wasserdampf an einem Gefrierkern ohne den Zwischenschritt der flüssigen Phase. Wird dieser Zwischenschritt vollzogen und wirkt ein Aerosol zunächst als Kondensationskern und bei weiterer Abkühlung anschließend auch als Gefrierkern, so wird dies als Kondensationsgefrieren bezeichnet. In der Atmosphäre nimmt die Anzahl der aktivierbaren Gefrierkerne mit abnehmender Temperatur zu. Bei Temperaturen zwischen 0 °C und -10 °C sind nur sehr wenige Eiskeime aktiv und nur sehr wenige Tropfen gefrieren (Gultepe u. a., 2001). Bei Temperaturen von ca. -35 °C sind dann die meisten Gefrierkerne aktiviert und die Nukleation der festen Phase dominiert gegenüber der flüssigen Phase. Allgemein gilt, dass die Anzahl der Gefrierkerne (ca. 1 pro cm³ Luft) deutlich geringer ist als die Anzahl der Kondensationskerne (ca. 100 pro cm³ Luft). Ein weiteres Phänomen, das in der Atmosphäre beobachtet wird und die Vereisung in einer unterkühlten Flüssigwasserwolke initiieren kann, ist der sogenannte seeder/feeder Effekt. Er beschreibt den Vorgang, wenn Schnee oder Eisteilchen aus höherliegenden Wolken in die unterkühlte Flüssigwasserwolke fallen und dort als Gefrierkerne fungieren (Hauf & Brown, 1998).

II.3. Wachstum der Wolkenelemente und Entstehung von Niederschlag

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, expandieren Wolkenelemente nach dem Erreichen einer kritischen Anfangsgröße autark weiter. Flüssige Wolkenelemente wachsen auch nach Überschreitung des kritischen Radius und dem damit zusammenhängenden Maximum ihrer Köhler-Kurven zunächst durch Diffusion gasförmiger Wassermoleküle an der Tropfenoberfläche. Allerdings ist die Wachstumsrate eines Tropfens umgekehrt proportional zu seinem Radius und die Größe der Tropfen vereinheitlicht sich mit der Zeit. Durch Kondensation wachsen Wolkentropfen in der Zeitspanne, in der das Einsetzen des Niederschlags beobachtet werden kann, selten zu Tropfen mit Radien größer als $10\ \mu\text{m}$. Regentropfen besitzen aber einen Durchmesser von etwa $1\ \text{mm}$. In den warmen Wolken, in denen überall positive Temperaturen herrschen, kann die Entstehung von Regentropfen also nicht durch reine Kondensation erklärt werden. Selbst unter den günstigsten Bedingungen können durch Kondensation nur Sprühregentropfen, die einen Durchmesser von etwa $100\ \mu\text{m}$ bis $500\ \mu\text{m}$ besitzen, entstehen. Das immense Wachstum der Tropfen zu Regentropfen mit einer millionenfachen Steigerung des Volumens kann in warmen Wolken nur durch Kollision und Koaleszenz der Wolkentropfen erklärt werden. Auf die Tropfen wirken in der Atmosphäre gravitative, elektrische und aerodynamische Kräfte. In der Regel ist die Gravitationskraft dominant und die Tropfen fallen in Richtung Erdboden. Allerdings werden die Tropfen in Abhängigkeit ihrer Größe durch Luftreibung abgebremst. Große Tropfen fallen schneller und kollidieren so auf ihrem Fallweg mit kleineren und deswegen langsameren Tropfen. Teilweise werden die kleineren Tropfen im Luftstrom um die überholenden Tropfen herumgeführt oder prallen an deren Oberfläche ab. Teilweise fließen beide Kollisionspartner aber auch zusammen, bleiben stabil ohne wieder zu zerplatzen und bilden so einen vergrößerten neuen Tropfen. Dieser Vorgang wird als Koaleszenz bezeichnet und erklärt die Bildung von Regentropfen in warmen Wolken. Er spielt hauptsächlich in tropischen Regionen oder in konvektiven Wolkensystemen mit starken Aufwinden (Wallace & Hobbs, 2006) eine Rolle. In den mittleren Breiten läuft die Niederschlagsbildung im Winter in der Regel über die Eisphase, da Wolken dort normalerweise in negative Temperaturbereiche vorstoßen.

Nach Entstehung der ersten Eiskristalle herrscht innerhalb der unterkühlten Wolken kein stabiles Gleichgewicht zwischen den Wassertropfen und den Eispartikeln. In den Eiskristallen werden die Moleküle durch die größeren Anziehungskräfte stärker gebunden als im Wasser. Für die Sublimation muss also eine größere latente Wärme erbracht werden als für die Verdunstung. Dies bewirkt, dass das Gleichgewicht zwischen Deposition und Sublimation bei niedrigerem Dampfdruck eintritt als das Gleichgewicht zwischen Kondensation und Verdunstung. Dieser physikalische Effekt, dass bei gleich gestalteter und gleich temperierter Oberfläche der

Sättigungsdampfdruck über Eis geringer ist als über unterkühltem Wasser, wird als Bergeron-Findeisen-Theorie bezeichnet. Anschaulich gezeigt werden kann er beispielsweise mithilfe der empirischen Magnus-Formeln (Gleichung II.3 und II.4 aus Alduchov & Eskridge, 1996). Daraus können unter anderem die Werte in Tabelle II.1 berechnet werden. Ein Vergleich der Werte zeigt, dass das Verhältnis der beiden Sättigungsdampfdrücke umgekehrt proportional zur Lufttemperatur ist. Jedes Luftpaket, das in Bezug auf Wasser gesättigt ist, ist gleichzeitig übersättigt in Bezug auf Eis. Eine unterkühlte Mischwolke wandelt sich mit der Zeit immer in eine Eiswolke um, da die Eispartikel auf Kosten der Wassertropfen wachsen.

$$e_w(T) = 6.1094e^{\frac{17.625T}{243.04+T}} \quad (\text{II.3})$$

$$e_i(T) = 6.1121e^{\frac{22.587T}{273.86+T}} \quad (\text{II.4})$$

mit e_w Sättigungsdampfdruck über Wasser
 e_i Sättigungsdampfdruck über Eis
 T Temperatur (in °C)

T	e_w	e_i	$\frac{e_w}{e_i}$
0	6.10940	6.11210	0.999558
-5	4.21908	4.01573	1.05064
-10	2.86773	2.59672	1.10437
-15	1.91648	1.65109	1.16074
-20	1.25784	1.03126	1.21970
-25	0.809761	0.632056	1.28115

Tabelle II.1.: Empirische Werte für die Sättigungsdampfdrücke über Wasser und Eis in Abhängigkeit von der Temperatur (°C).

Neben der Größe ist auch die Form der Eispartikel von Temperatur und Sättigungsgrad der Atmosphäre abhängig. In Abbildung II.4 sind die Grundformen der Eisteilchen und die für die Entstehung favorisierten Verhältnisse dargestellt. Bei warmen Temperaturen (0 °C bis ca. -4 °C) bilden sich vor allem dünne Plättchen bei geringer Übersättigung und kleine dendritische Sterne bei höheren Übersättigungsgraden. Im Temperaturbereich -4 °C bis -10 °C entstehen hauptsächlich massive oder hohle Prismen bzw. nadelförmige Strukturen. Große sternförmige Dendriten oder große, in Sektoren eingeteilte Platten entwickeln sich bei Temperaturen zwischen -10 °C und -22 °C. Bei noch kälteren Temperaturen bilden sich vor allem wieder kleinere Plättchen oder Prismen. Wie bei der Kondensation ist das diffusive Wachstum aber nicht die einzige Möglichkeit. Die Eispartikel bewegen sich in der Mischwolke und kollidieren mit unterkühlten Wassertropfen oder anderen Eiskristallen. Bei der Kollision mit Tropfen können diese an den Eisteilchen anfrieren. Dabei wachsen die Eiskristalle und ändern ihre Gestalt. Teilweise entstehen so poröse Kugeln mit einem Durchmesser von einigen Millimetern. Diese Kugeln werden als Graupel bezeichnet. Die Kollision zweier Eispartikel kann dazu

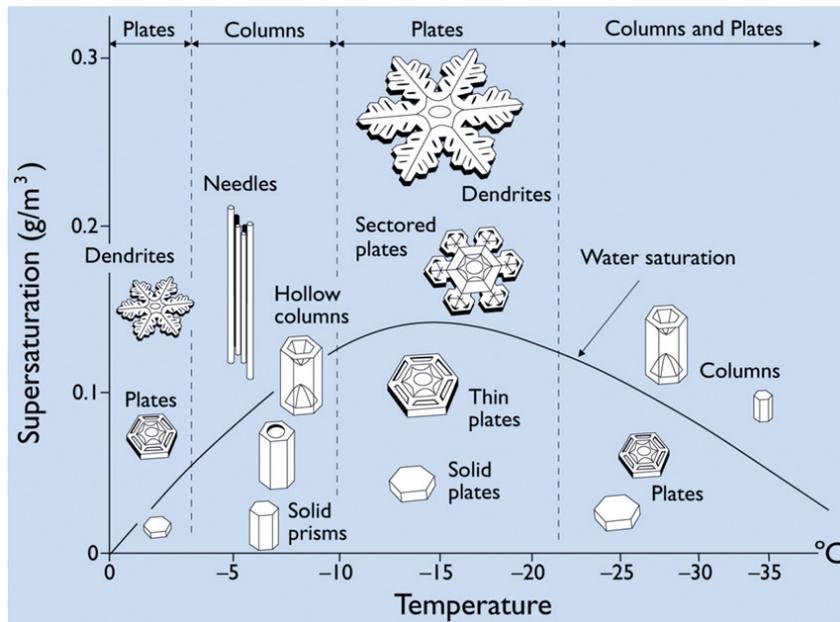


Abbildung II.4.: Die Morphologie von Eiskristallen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der Eissättigung. Abbildung aus Libbrecht (2005).

führen, dass sich die Kollisionspartner ineinander verhaken oder aneinander kleben bleiben. Ob diese Aggregation nach einer Kollision stattfindet, hängt hauptsächlich von der Fallgeschwindigkeit, von der Eiskristallart und von der Temperatur ab. Kompliziert aufgebaute Kristalle, wie z. B. dendritische Schneesterne mit vielen Verzweigungen, verhaken sich bei einer Kollision, während einfache Platten aneinander abprallen. Bei höheren Temperaturen (wärmer als -5 °C) sind die Oberflächen der Eisteilchen etwas klebriger als bei tiefen Temperaturen und die Partikel können sich durch Kollisionen miteinander verbinden (Wallace & Hobbs, 2006). Da die Fallgeschwindigkeit von Schneesternern oder Eisnadeln (ca. 50 cm/s) im Vergleich zur Fallgeschwindigkeit von Regentropfen (ca. $200 - 800\text{ cm/s}$) deutlich kleiner ist und sich die Eiskristalle somit deutlich länger in der Niederschlagswolke aufhalten, ist in Eiswolken zudem eine erhöhte Kollisionseffizienz zu erwarten (Houze, 1993). Niederschlagsentstehung in realistischen Zeitspannen kann in den mittleren Breiten größtenteils nur über die Wachstumsprozesse der Eisphase erklärt werden. Lediglich sehr leichter Niederschlag in Form von einzelnen Eiskristallen oder leichtem Nieselregen lässt sich durch rein diffusives Wachstum interpretieren. Das Wachstum durch reine Kondensation in warmen Wolken läuft aber meistens selbst für derart kleine Niederschlags-elemente zu langsam ab. Das bedeutet, dass auch im Falle des leichten Nieselregens in vielen Situationen der Umweg über die Eisphase erfolgt sein muss. Die Eiskristalle schmelzen dabei in der Luft mit positiven Temperaturen unterhalb der Wolke, bevor sie den Boden erreichen. In den meisten Wolken spielen sowohl die Theorie zur Entstehung von Regen in warmen Wolken als auch die niederschlagsbildenden Mechanismen über die Eisphase eine Rolle.

Welcher Prozess in der Wolke dominiert und welcher Niederschlagstyp letztendlich am Boden beobachtet werden kann, hängt von vielen Parametern wie der Temperatur an der Wolkenobergrenze, den atmosphärischen Verhältnissen unterhalb des Kondensationslevels oder dem Flüssigwassergehalt der Wolke ab (Rogers & Yau, 1996).

II.4. Niederschlagsbildende Prozesse in winterlichen Wettersituationen

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, entstehen Wolken durch Kondensation oder Sublimation in gegenüber Wasser oder Eis übersättigter Luft. Wie aber entwickelt sich eine derartige Übersättigung des Wasserdampfes in der realen Atmosphäre? Aus den Gleichungen II.3 und II.4 ist ersichtlich, dass der Sättigungsdampfdruck von der Temperatur abhängig ist. Je wärmer die Temperatur, umso größer ist der maximale Wasserdampfgehalt eines Luftvolumens. Sinkt die Temperatur eines Luftvolumens wird dadurch automatisch der Sättigungswert erreicht oder überschritten. In der Atmosphäre existieren mehrere Prozesse, die zu einer Übersättigung des Wasserdampfes führen können. Laut Pruppacher & Klett (1997) ist die am häufigsten vorkommende Variante die Hebung und die damit einhergehende Expansion und adiabatische Abkühlung eines Luftpaketes. In labiler Schichtung der Atmosphäre entstehen so teilweise hochreichende konvektive Wolkensysteme. Ist die Atmosphäre dagegen stabil geschichtet und gleichzeitig eine advektive Horizontalströmung vorhanden, können Luftmassen unterschiedlicher Temperatur aneinander aufgleiten und schichtförmige Wolken bilden. Diese haben in der Regel eine wesentlich größere horizontale Ausdehnung und Lebensdauer als konvektive Wolken und spielen auch bei der Betrachtung von Winterwetter eine wichtigere Rolle. Konvektion und Destabilisierung der Atmosphäre sind Produkte der Aufheizung und des Feuchtezuwachses der bodennahen Luftschichten (Stevens, 2005). Im Winter beherrschen aber oft kalte Luftmassen den unteren Bereich der Troposphäre. Die verkürzte Sonnenscheindauer und der niedrige Sonnenwinkel erlauben dabei vielfach keine Aufheizung dieser Luftmassen und sorgen größtenteils für stabile Verhältnisse. Deswegen kommt es in den Wintermonaten seltener zu konvektiver Wolkenbildung. Advehierte warme Luftmassen z. B. im Zuge einer Warmfront werden dagegen an den vorherrschenden kalten Luftmassen gehoben und bilden Inversionen und großflächige Schichtwolken. Auch horizontale Konvergenzströmungen können zu einer großskaligen Hebung führen sowie in ausgedehnten und kontinuierlichen Niederschlägen resultieren. Kaltfronten im Winter sind oft mit einer mit der Höhe zunehmenden frontsenkrechten Windkomponente verknüpft. Die Hebung der warmen Luft, die durch die Front hervorgerufen wird, wird durch das Absinken der kalten Höhenluft gebremst, erfolgt dann nur in den untersten Schichten und es bilden sich ebenfalls großräumige niederschlagsfä-

hige Stratuswolken. Teilweise kommt es sogar vor, dass bei dem Durchzug einer Kaltfront ein Temperaturanstieg beobachtet werden kann. Dann wird die vorherrschende kalte Luft von etwas milderer maritimer Luft verdrängt und man spricht von einer sogenannten maskierten Kaltfront. Bei entsprechender Wetterlage können sich im Winter an Kaltfronten aber auch mächtige Gewitter entwickeln. Zudem sind in einer Stratusschicht eingelagerte Konvektionswolken oder mehrere Stratusschichten übereinander möglich. Werden Luftmassen in stabiler Schichtung durch die Orographie zum Aufsteigen gezwungen, können vor und über dem Hindernis ebenfalls mächtige schichtförmige Wolken mit viel Niederschlag entstehen (Smith, 2004).

Adiabatische Abkühlung durch Hebung ist aber nicht die einzige Möglichkeit eine Übersättigung des Wasserdampfes zu erhalten und Wolkenbildung zu erklären. Die diabatische Abkühlung ist ein weiterer im Winter oft auftretender Wolkenbildungsprozess. Dabei wird die bodennahe Luftschicht durch ihre Nähe zu einer kalten Erdoberfläche bis zum Taupunkt abgekühlt. So entsteht eine Bodeninversion, unterhalb der sich Nebel in ansonsten wolkenfreiem Himmel bilden kann. Beispiele dafür sind der Strahlungsnebel, der sich bildet, wenn in wolkenlosen, windschwachen Nächten die unteren Luftschichten durch Strahlungsabkühlung der Erdoberfläche beeinflusst werden oder der Advektionsnebel, der entsteht, wenn warme Luft über einen kalten Untergrund strömt und dabei abkühlt. Durch Turbulenzen am Boden kann die Abkühlung eine relativ mächtige Schicht erfassen (etwa mehrere hundert Meter). Der Nebel liegt dann oft nicht am Boden auf, sondern sorgt als tiefliegende Stratuswolke eventuell sogar für leichten festen oder flüssigen Niederschlag.

Eine der wichtigsten Fragestellungen bei der Forschung im Bereich Winterwetter ist, welcher Niederschlagstyp im Einzelfall vorliegt. In den meisten Fällen ist dabei hauptsächlich interessant, welcher Niederschlagstyp am Boden ankommt. Für Flugzeuge, die die Wolken durchfliegen müssen, ist aber auch entscheidend, was sich innerhalb der Wolken abspielt. Wenn der Niederschlag als Regen den Boden erreicht, muss unterhalb der Wolke eine Luftschicht mit warmen Temperaturen vorhanden sein. Nur so ist das Schmelzen des im Normalfall vorhandenen festen Niederschlags zu erklären. Nach Stewart (1985) und Stewart & King (1987) muss das vertikale Ausmaß dieser Schicht bei minimal positiven Temperaturen etwa 300 m betragen. In Abhängigkeit vom Temperaturgradienten können aber auch bei dünneren und wesentlich dickeren Warmluftschichten noch feste Niederschlagsteilchen beobachtet werden (Braun & Houze, 1995). Ist keine oder keine ausreichend dicke Schmelzschicht vorhanden, muss am Boden mit Schnee oder mit Schneeregenschnee gerechnet werden. Durch den Schmelzprozess wird der Umgebung latente Wärme entzogen. Dies kann dazu führen, dass sich die Luft in der warmen Schicht abkühlt und den Schmelzprozess der Eispartikel behindert. Obwohl dieser Effekt in der realen Atmosphäre meistens durch vertikale oder horizontale Temperaturadvektion überlagert wird, kann er im Einzelfall doch wichtig werden. Kain u. a.

(2000) beschreiben einen derartigen Fall aus dem Jahr 1998 im östlichen Teil des US-Bundesstaates Tennessee, bei dem sowohl Behörden als auch Öffentlichkeit von einem Sturm mit einem Übergang des Niederschlagstyps überrascht wurden. Auch andere latente Wärmeeffekte treten in der Atmosphäre auf. So kühlt sich die Luft durch das Freiwerden latenter Wärme während des Verdunstungs- oder Sublimationsprozesses ab oder erwärmt sich durch die Absorption latenter Wärme während des Gefrier- oder Kondensationsprozesses. Durch diese Effekte kann sich unter Umständen das vertikale Temperaturprofil verschieben und der Niederschlagstyp am Boden ändern (Lackman u. a., 2002). Einige Forschungsansätze (z. B. Ramer 1993, Schuur u. a. 2012 oder Park u. a. 2012) verwenden deshalb die Feuchtetemperatur, um diese Effekte zu berücksichtigen. Andere Ansätze (z. B. Baldwin & Contorno 1993, Tafferner u. a. 2003 oder Bernstein u. a. 2005) berücksichtigen die vorhandene Feuchte über Taupunkt, relative Feuchte oder Flüssigwassergehalt der vertikalen Luftsäule. In welchem Ausmaß diese latenten Effekte Einfluss auf den Niederschlagstyp haben und inwieweit sie von advektiven oder konvektiven Prozessen überlagert oder eliminiert werden, kann in der Regel im Einzelfall nicht nachvollzogen werden.

II.4.1. Schnee - Mischniederschlag - Regen

Die Abbildungen II.5(a) und II.5(b) zeigen schematisch typische vertikale Temperaturprofile für die Entstehung von Schnee bzw. teilweise geschmolzenem Schnee. Dieser teilweise aufgeschmolzene Niederschlag wird in der Folge als Mischniederschlag oder Schneeregen bezeichnet. Wie in Kapitel II.2 dargelegt wurde, können in unterkühlten Wolken flüssige Niederschlagsteilchen existieren. Die Arbeit von Rauber u. a. (2000) zeigt, dass bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt kaum Eiskristalle entstehen und dass bei Temperaturen unterhalb von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung von Eispartikeln mit abnehmender Temperatur zunimmt. Bei Temperaturen unterhalb von $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ können kaum noch flüssige Elemente in den Wolken gefunden werden (Korolev u. a., 2003). Ein entscheidender Parameter ist dabei die Temperatur an der Wolkenobergrenze. In der obersten Wolkenschicht, die bei Schichtwolken durch Inversionen meist klar definiert und begrenzt ist, findet sich aufgrund von turbulenten und radiativen Prozessen ein im Vergleich zur restlichen Wolke erhöhter Flüssigwassergehalt (Rauber u. a., 2001). Dort ist also die höchste Nukleationsrate zu finden. Unterschreitet die Temperatur an der Wolkenobergrenze nun den Grenzwert von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bilden sich dort vor allem Eiskristalle, die anwachsen und auf ihrem Fallweg durch die Wolke Vereisung initiieren können. Ist die Temperatur an der Wolkenobergrenze wärmer als $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, ist dies ein Indikator für die Dominanz von unterkühltem Flüssigwasser innerhalb der Wolke (Politovich & Bernstein, 1995). Wie bereits angesprochen, können aber auch bei deutlich kälteren Temperaturen noch unterkühlte Tropfen in der Wolke auftreten. Abbildung II.5(a) zeigt nun den Fall, wenn die Wolke komplett vereist

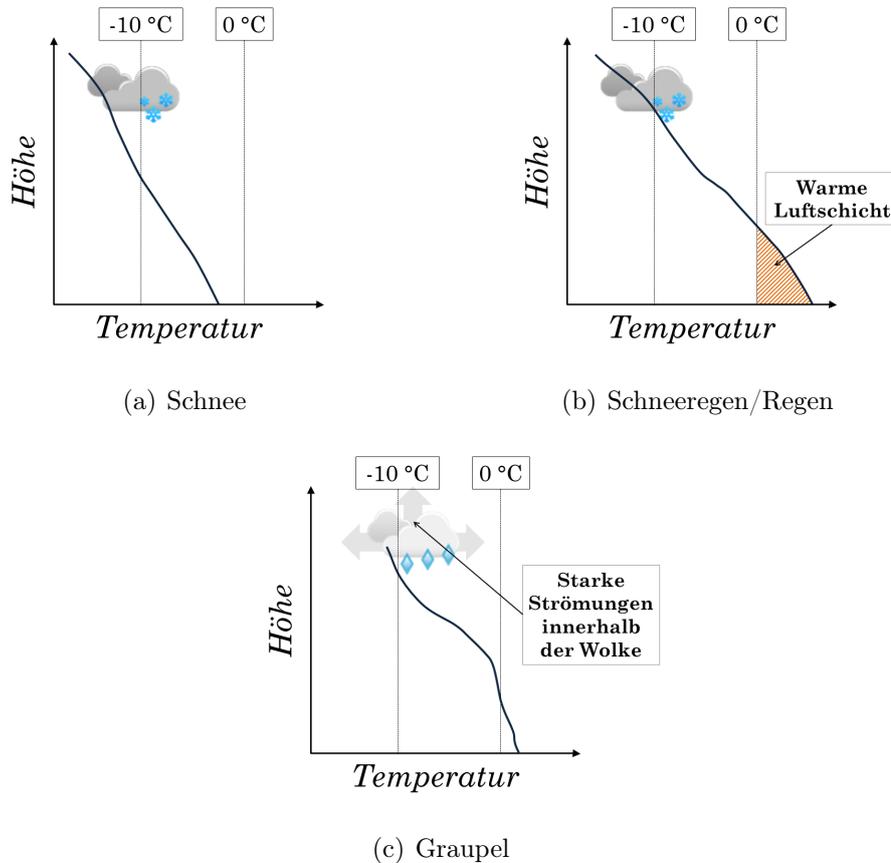


Abbildung II.5.: Schematisierte vertikale Temperaturprofile für die Winterwetterszenarien Schnee (a), Schneeregen/Regen (b), Graupel (c).

ist und die Schneeteilchen auf ihrem Weg zum Erdboden keine warme Luftschicht durchqueren. Der Niederschlag kommt in diesem Fall als Schnee am Boden an. Abbildung II.5(b) zeigt schematisch das Szenario für Mischniederschlag bzw. sogenannten kalten Regen. In der Höhe entsteht dabei Niederschlag über die Eisphase. Über dem Erdboden liegt eine Luftschicht mit positiven Temperaturen, in der die Eispartikel je nach Temperatur und Feuchte der Luftschicht teilweise oder komplett aufschmelzen. Je trockener diese warme bodennahe Luftschicht ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass Schneeflocken bei positiven Temperaturen den Boden erreichen. Besitzt die bodennahe Schicht hingegen eine hohe relative Feuchte, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass die Eisteilchen dort schmelzen und am Boden flüssiger Niederschlag beobachtet wird. Die Begründung dafür kann wieder in den latenten Wärmeeffekten gefunden werden. Durch das Durchqueren einer warmen Luftschicht bildet sich an den Eispartikeln Schmelzwasser. Verdunstet dieses Schmelzwasser in der gleichzeitig trockenen Luft, wird dem System latente Wärme entzogen und der Schmelzvorgang schwächt sich ab (Mitra u. a., 1990). Ein weiteres Kriterium, welches bei der Bildung von Schnee betrachtet werden muss, ist die

Temperatur an der Wolkenobergrenze. Ist es dort warm, also weist die Temperatur Werte im Bereich von etwa $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf, so ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass innerhalb der Wolke unterkühlte Tropfen und Eispartikel parallel existieren. Es kann so sowohl flüssiger als auch fester Niederschlag gebildet werden. Auch Mischformen sind möglich. Sind gleichzeitig starke Strömungen in der Wolke vorhanden, beispielsweise kräftige Aufwinde, wie sie bei Konvektion in labiler Schichtung vorkommen, bilden sich Graupel als weitere Variation des Mischniederschlags (Steiner & Smith, 1998). Da ihre Entstehung in der Regel mit Konvektion verbunden ist, treten sie vor allem in Schauerwetterlagen oder auch zu Beginn eines länger andauernden Schneefalls auf, falls sie in einer eventuell vorhandenen warmen Luftschicht nicht zu Regentropfen schmelzen (vgl. Abb. II.5(c)).

II.4.2. Gefrierender Regen - Eisregen/Eiskörner - Regen

Fällt in der Höhe gebildeter Niederschlag durch eine Luftschicht mit positiven Celsius-Temperaturen und anschließend durch eine unterkühlte Luftschicht, kann sich gefrierender Regen oder Eisregen bzw. Eiskörner bilden (Bourgouin, 2000). Die Abbildungen II.6(a) und II.6(b) zeigen den schematischen Temperaturverlauf mit der Höhe für diese Szenarien. Welcher Niederschlag bei einem derartigen Temperaturverlauf zu beobachten ist, hängt wiederum von mehreren Faktoren ab (Zerr, 1997). Der erste Faktor ist die Ausdehnung und Intensität der gerne als warme Nase bezeichneten Luftschicht mit positiven Temperaturen. Entscheidend ist, ob die ursprünglichen Eispartikel komplett zu Wassertropfen schmelzen oder ob durch ein unvollständiges Aufschmelzen Eispartikel, die in der darauffolgenden Unterkühlung wieder als Eiskeime fungieren können, bestehen bleiben. Der zweite entscheidende Faktor ist das Ausmaß der unterkühlten Schicht unterhalb der warmen Nase. Die dort geschmolzenen Tropfen werden, je nachdem die Verhältnisse sind, entweder zu gefrierendem Regen unterkühlt oder durchlaufen eine erneute Phasenumwandlung und gefrieren zu Eiskörnern. Dieser Niederschlagstyp wird auch als Eisregen bezeichnet. Die Abbildungen II.6(a) und II.6(b) schematisieren beide Szenarien. Schneefall aus höhergelegenen Schichten schmilzt in der warmen Luftschicht. Dabei wird latente Wärme absorbiert, die bei einem nachfolgenden Gefrieren wieder frei wird. Das bedeutet, dass sich die Warmluftnase durch die Phasentransformationen abkühlt, während die kalte Luftschicht durch den umgekehrten Prozess erwärmt wird. Unter bestimmten Umständen ist ein derartiges Szenario also ein sich selbst limitierender Prozess (Stewart, 1985). Auch hier gilt aber die Aussage, dass die latenten Wärmeeffekte durch andere Mechanismen überlagert werden können. Liegt unterhalb der kalten Luftschicht eine weitere warme Luftschicht am Boden auf, können Eiskörner wieder zu Regentropfen transformiert werden oder unterkühlte Tropfen auf positive Temperaturen erwärmt werden (Abbildung II.6(c)). Ein typisches Wetterszenario, bei dem derartige Temperaturprofile flächendeckend auftreten können, ist der Durchgang einer Warmfront. Warme Luft gleitet dabei auf

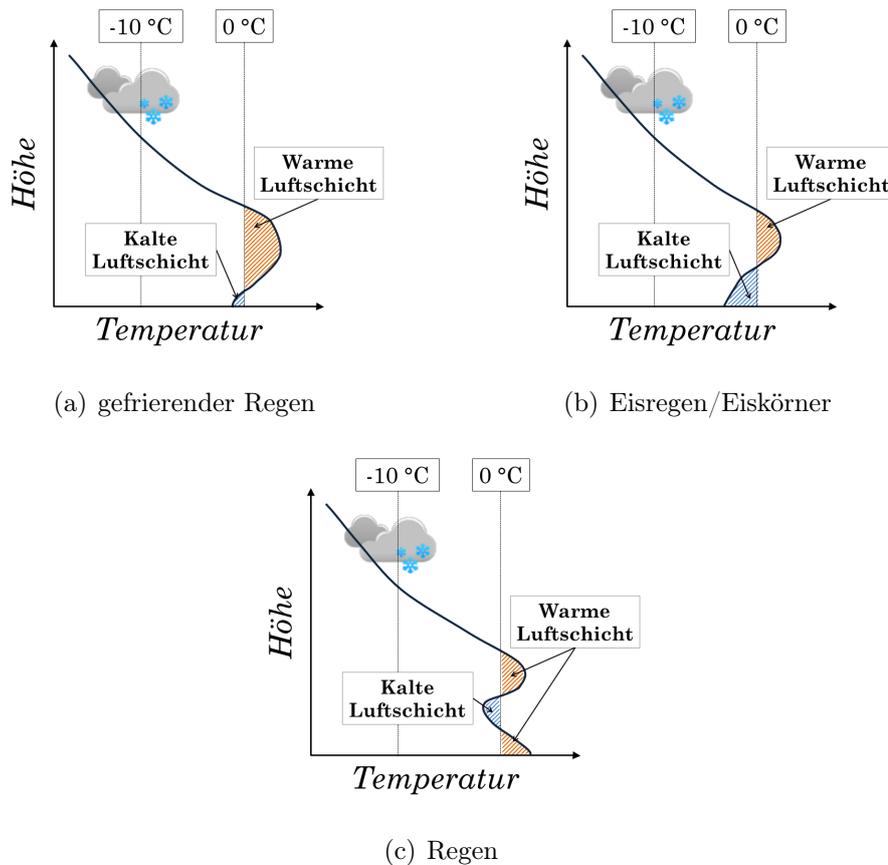


Abbildung II.6.: Schematisierte vertikale Temperaturprofile für die Winterwetterszenarien gefrierender Regen (a), Eisregen/Eiskörner (b), Regen (c).

vorherrschende Kaltluft auf, sinkt aufgrund der stabilen Schichtung nur sukzessive in tiefere Luftschichten ab und schafft so die entsprechende Wettersituation mit warmer Luft oberhalb der kalten Luft.

II.4.3. Gefrierender Niesel - Vereisung in Wolken

Der Prozess mit einer zwischen zwei Kaltluftschichten eingelagerten Schmelzschicht ist nicht der einzige Mechanismus, über den gefrierender Niederschlag entstehen kann (Cober u. a., 1996). Laut Huffman & Norman (1988) stehen etwa 25 Prozent der gefrierenden Niederschläge nicht in Verbindung mit dem oben beschriebenen Entstehungsprozess. Ein weiterer Mechanismus ist die Bildung von unterkühlten Wassertropfen über den Kollision-Koaleszenz-Prozess (Bernstein, 2000). Wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, befindet sich in Wolken, deren Temperatur an der Wolkenoberkante -10 °C nicht unterschreitet bevorzugt kondensiertes unterkühltes Flüssigwasser (Geresdi u. a., 2005). Wie bereits gezeigt wurde, reicht

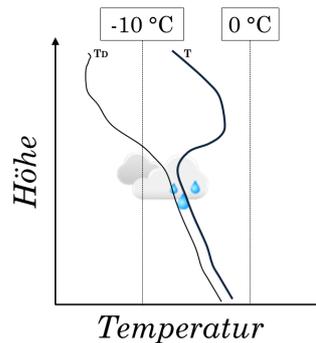


Abbildung II.7.: Schematisiertes Temperaturprofil für die Winterwetterszenarien gefrierender Niesel/Vereisung in stratiformer Bewölkung mit großen unterkühlten Tropfen (SLD).

die Wachstumsrate über den sogenannten unterkühlten Warmer-Regen-Prozess in vielen Fällen nicht aus, um die Entstehung von Nieselregen zu erklären. Der limitierende Faktor ist dabei vor allen Dingen die fehlende Anfangsgröße der Tropfen. Effiziente Koaleszenz tritt erst auf, wenn die mittlere Tropfengröße $40\ \mu\text{m}$ überschreitet. In der Literatur existieren mehrere Ansätze, um die dennoch auftretenden Wettersituation mit gefrierendem Niesel zu erklären (Rasmussen & Cole, 2002). Pobanz u. a. (1994) präsentieren den Ansatz, dass durch Windscherung induzierte Einmischung trockener Luft an der Wolkenobergrenze zu einer hohen Übersättigung und einer Verbreiterung des Tropfenspektrums führt und so den Kollision-Koaleszenz-Prozess in Gang bringt, während Korolev & Isaac (2000) die isobare Vermischung trockener und feuchter Luftmassen in stabil geschichteter Umgebung als Ursache identifizieren. Studien von Rasmussen u. a. (1995) und Cober u. a. (1996) zeigen aber, dass gefrierender Niesel häufig auch bei minimaler oder sogar ohne jegliche Windscherung oder Vermischung auftritt. In diesen Studien wird eine geringe Anzahl an Kondensationskernen (ca. 40 pro cm^3) für das rasche Wachstum der Wolkenröpfchen verantwortlich gemacht. Auch die strahlungsbedingte Abkühlung einzelner Tropfen (Roach, 1976), verschiedene Krümmungs- und Lösungseffekte (Celik & Marwitz, 1999) und der Einfluss von Riesen-Kernen (Feingold u. a., 1999) werden als Möglichkeiten diskutiert. Abbildung II.7 zeigt das schematisierte Profil für ein typisches Szenario mit gefrierendem Niesel. Die Wolkenobergrenze ist durch eine Inversion klar definiert und weist eine Temperatur im unterkühlten Bereich oberhalb von $-10\ \text{°C}$ auf. Fallen Tropfen aus der Wolke heraus und verdunsten in den trockeneren Luftschichten unterhalb der Wolke nicht, sondern erreichen bei negativen Temperaturen den Boden, wird dort gefrierender Niesel beobachtet. Reicht die Tropfengröße dagegen nicht aus, um Niederschlag zu bilden, besteht dennoch zumindest innerhalb der Wolke die Gefahr von Vereisung.

II.5. Problematik der Winterwetterszenarien für Flughäfen

Winterliche Wetterbedingungen haben signifikanten Einfluss auf vielfältige Bereiche des Verkehrs- und Transportwesens. Besonders problematisch für Flughafenbetreiber sind die folgenden meteorologischen Bedingungen (ICAO, 2002):

- Andauernder gefrierender Regen,
- anhaltende Vereisung der Bewegungsflächen,
- plötzlicher strahlungsbedingter Abfall der Bodentemperatur bei feuchten Bedingungen,
- plötzliche Temperaturschwankungen um den Gefrierpunkt in Verbindung mit Regen oder Schnee.

Im Kapitel III wird beschrieben, welches Ausmaß die Beeinträchtigung durch Winterwetter in Bezug auf Pünktlichkeit, Effizienz und Sicherheit haben kann und wie am Flughafen München auf entsprechende Situationen reagiert wird. In diesem Kapitel sollen nun zunächst die physikalischen Hintergründe der Ursachen und der operationellen Maßnahmen gegen die Beeinträchtigungen erläutert werden.

II.5.1. Kontamination der Bewegungsflächen mit Schnee oder Eis

Wenn Straßen, Zufahrtswege oder Start- und Landebahnen vereist oder schneebedeckt sind, ändern sich die Reibungswerte für die sie benutzenden Fahrzeuge. Dadurch wird vor allen Dingen das Bremsverhalten der Maschinen beeinflusst. Im Allgemeinen wird der Reibungskoeffizient, der das Verhältnis von lateraler Reibungskraft zwischen zwei Oberflächen und der Normalkraft des Körpers beschreibt, als entscheidendes Kriterium angegeben (Ghandour u. a., 2010). Er ist von mehreren Faktoren abhängig. Tabelle II.2 zeigt einen Überblick über die Wichtigsten dieser Faktoren. Ist der Fahrbelag mit Schnee oder Eis kontaminiert, vermindert sich der Reibungskoeffizient. Selbstverständlich spielen auch die Bodentemperatur, die Niederschlagsmenge und damit verbunden die Dicke der Kontaminationsschicht eine entscheidende Rolle. In Tabelle II.3 ist die Bremswirkung in Abhängigkeit vom Reibungskoeffizienten nach internationalen Richtlinien dargestellt (ICAO, 2002). Man sieht, dass bei einer dünnen Kontaminationsauflage unabhängig von der Temperatur noch relativ gute Bremswirkungen gemessen werden können, während der Reibungskoeffizient bei dickeren Auflagen stärker von der Temperatur abhängig ist. Bei starkem Niederschlag und Temperaturen von mehr als -3 °C muss auch mit der Gefahr des Aquaplanings gerechnet werden. Dabei verliert der Fahrzeugreifen

Straße	kontaminierender Stoff	Reifen
Temperatur	Temperatur	Temperatur
Wärmeleitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeit
Wärmekapazität	Wärmekapazität	Wärmekapazität
Oberflächenstruktur	chemische Zusammensetzung	Reifenprofil
Unebenheiten	Viskosität	Material
Chemische Materialeigenschaften	Dichte	Reifendruck
	Schichtdicke	Belastung
		Rollgeschwindigkeit

Tabelle II.2.: Einflussfaktoren auf den Reibungskoeffizienten nach Wallman & Aström (2001).

durch die Kontamination den direkten Kontakt zur Straßenoberfläche und jeder Bremsversuch wird ineffektiv (Comfort, 2001). Die logistischen Maßnahmen des Flughafen Münchens gegen diese Gefahren werden in Kapitel III angesprochen. Start- und Landebahnen sowie Straßen und Zufahrtsflächen werden in der Regel mechanisch geräumt und anschließend mit Enteisungsmitteln behandelt, um eine weitere Neuschnee- oder Eisakkumulation zu verhindern. Im Ernstfall wird Enteisungsmittel auch eingesetzt, um eine bestehende Eisschicht aufzuweichen und entfernen zu können. Die Enteisungsmittel sind entweder flüssiges Kaliumformiat oder Natriumformiat in granularer Form (MUC, 2012). Beides sind Bestandteile der Ameisensäure und setzen den Gefrierpunkt im Vergleich zu reinem Wasser deutlich herab. Sie sind natürlich abbaubar und daher besonders umweltverträglich. Allerdings greifen sie die mit ihnen in Berührung kommenden Karbonbremsen der Flugzeuge korrosiv an und werden deshalb zum Beispiel in skandinavischen Ländern, in denen viel mit Enteisungsmitteln gearbeitet werden muss, nur noch selten eingesetzt (Alatypö, 2008).

II.5.2. Kontamination der Flugzeuge mit Schnee oder Eis

Bei winterlichen Bedingungen am Flughafen sind nicht nur Bewegungsflächen betroffen, sondern auch Flugzeuge, die sich zum fraglichen Zeitpunkt dort befinden. Bereits eine minimale Kontamination der Tragflächen mit Schnee oder Eis kann die Aerodynamik der Maschine signifikant ändern und zum Beispiel den Auftrieb um mehr als 30 Prozent reduzieren sowie den Reibungswiderstand um bis zu 40 Prozent erhöhen. Dadurch wird die Abrissgeschwindigkeit erhöht, was wiederum durch verstärkten Schub ausgeglichen werden muss und in zu zusätzlichem Treibstoffverbrauch führt. Bei noch dickerer oder rauerer Kontamination kann die aerodynamische Stabilität und Kontrollierbarkeit der Maschine völlig verloren gehen. Auch die Gewichtszunahme durch die Kontamination kann ab einem

Kontamination der Bahn	Reibungskoeffizient	Beobachtung der Abbremsung und Richtungssteuerung	Bremswirkung
<ul style="list-style-type: none"> • Nass • Rauhref weniger als 3 mm mit: <ul style="list-style-type: none"> • Wasser • Schneematsch • Schnee (trocken) • Schnee (nass) 	≥ 40	Normal	<i>Good</i>
	36 - 39	Normal oder minimal beeinträchtigt	<i>Medium to Good</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Nass (rutschig) $T \leq -3 \text{ }^\circ\text{C}$: <ul style="list-style-type: none"> • Schnee (nass oder trocken) mit mehr als 3 mm 	30 - 35	Spürbar beeinträchtigt	<i>Medium</i>
mehr als 3 mm: <ul style="list-style-type: none"> • Wasser • Schneematsch $T > -3 \text{ }^\circ\text{C}$: <ul style="list-style-type: none"> • Schnee (nass oder trocken) mit mehr als 3 mm • Kompakter Schnee 	26 – 29	Schlecht Aquaplaning möglich	<i>Medium to Poor</i>
$T \leq -3 \text{ }^\circ\text{C}$: <ul style="list-style-type: none"> • Eis 	21 – 25	Deutlich beeinträchtigt	<i>Poor</i>
Nasses Eis Eis ($T > -3 \text{ }^\circ\text{C}$)	0 – 20	Nicht vorhanden oder minimal	<i>NIL</i>

Tabelle II.3.: Beurteilungskriterien für den Bericht über den Zustand der Start- und Landebahnen nach FAA (2009).

bestimmten Punkt nicht mehr vernachlässigt werden. Neben diesen aerodynamischen Beeinträchtigungen gibt es noch andere potentielle Gefahren. So können Eisschichten während des Starts oder im Flug abbrechen, in die Triebwerke gesaugt werden und dort Schäden anrichten. Die Vereisung von Messinstrumenten ist möglicherweise verantwortlich für fehlerhafte Angaben über Geschwindigkeit, Flughöhe oder Anstellwinkel. Aus diesem Grund gilt für alle Flugzeuge das sogenannte Clear-Aircraft-Prinzip. Eine Maschine darf erst starten, wenn alle kritischen Flächen und alle Messinstrumente von Schnee und Eis befreit sind. Ein negatives Beispiel für die Vernachlässigung dieses Prinzips ist der tödliche Unfall einer Britten Norman/BN2-2B-26 am 26.12.2001. Dort wurde vor dem Start versäumt den Schneebeleg, der sich während eines Schauers bei Temperaturen um den Gefrierpunkt gebildet hatte, zu entfernen. Die Maschine mit 9 Personen an Bord stürzte wenige Augenblicke nach dem Start auf dem Verkehrslandeplatz Bremerhaven in die Weser. Die Hauptursache war, dass durch den Schneebeleg die Umströmung der Tragfläche gestört und damit der Auftrieb verringert war (BFU, 2004). Eisansatz an Flugzeugen tritt nicht nur bei den Maschinen am Boden auf, sondern kann auch während des Fluges eine Rolle spielen. Auf dieses Problem des

sogenannten „Inflight-Icing“ wird im späteren Verlauf dieses Kapitels noch kurz eingegangen. Im Prinzip sind alle größeren kommerziellen Maschinen heutzutage mit Enteisungsvorrichtungen ausgestattet oder haben ihre aerodynamische Stabilität und Kontrollierbarkeit demonstriert und sind für den Flug unter Vereisungsbedingungen zertifiziert (Cober u. a., 2009). Die Schutzvorrichtungen sind entweder thermischer Natur, bei der die Flügelvorderkanten erhitzt werden, um Eisansatz zu verhindern, hydraulischer Natur, bei der Gummimatten an der Flügelvorderkante durch Druckluft aufgeblasen werden, um vorhandenen Eisansatz wegzusprenge, oder flüssiger Natur, bei der die Flügel mithilfe von integrierten Vorrattanks mit Enteisungsmittel benetzt werden (Steuernagle u. a., 2002). Kontamination am Boden kann aber komplett andere Charakteristika aufweisen als das „Inflight-Icing“. So können am Boden Flugzeugkontaminationen an Stellen auftreten, die nicht von Enteisungsvorrichtungen geschützt sind und deren Auswirkungen auf das Flugverhalten nicht ausreichend getestet und zertifiziert wurde.

Für die Flugzeugvereisung am Boden können mehrere Szenarien verantwortlich sein. Neben den offensichtlichen Winterwettersituationen gefrierender Niederschlag, Schnee und das Ansetzen von Frost in einer über Eis gesättigten Atmosphäre existieren noch weitere potentiell problematische Umstände. So können Kontaminationen auf den Bewegungsflächen oder deren Umgebung durch Wind, Turbulenzen und den Betrieb des Bodenpersonals oder des Flugzeugs selbst aufgestoben und auf der Maschine abgelagert werden. Auch die physikalische Beschaffenheit der Maschinen kann zu potentiell gefährlicher Vereisung führen. Wenn fester Niederschlag in Form von Schnee bei negativen Temperaturen auf eine warme Flugzeugoberfläche fällt, kann er dort schmelzen und anschließend zu Eis gefrieren. Ist die Oberfläche des Flugzeugs hingegen sehr kalt, z. B. weil es gerade aus großen Höhen gelandet ist und der Treibstoff in den Flügeln auf bis zu $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ unterkühlt wurde oder weil die Maschine kurz zuvor mit kaltem Treibstoff betankt worden ist, und wird gleichzeitig flüssiger Niederschlag oder gesättigte atmosphärische Verhältnisse beobachtet, so können sich auch noch bei Umgebungstemperaturen von bis zu $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ Eisschichten auf der Maschine bilden. In Fachkreisen spricht man in einem solchen Fall vom Cold-Soak-Effekt (ICAO, 2000). An den Flughäfen werden verschiedene Enteisungsmittel eingesetzt, um die Maschinen einerseits von Schnee- und Eiskontamination zu befreien (De-Icing) und um andererseits eine weitere Akkumulation zu verhindern oder zumindest zu verzögern (Anti-Icing). Am Flughafen München wird mit den Enteisungsfluiden vom Typ I und Typ IV nach ISO-Standard gearbeitet. Beide enthalten einen hohen Anteil an Glykol und senken den Gefrierpunkt im Vergleich zu reinem Wasser deutlich herab. Das Enteisungsfluid vom Typ I ist dünnflüssig, wird im Verhältnis 55:45 mit Wasser vermischt und vor dem Aufsprühen auf die Flugzeuge auf $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhitzt. Es wird als De-Icing Mittel eingesetzt, um bestehende Eisschichten zu entfernen. Es hat aufgrund seiner geringen Viskosität nur eine kurze Vorhaltezeit. Bei andauernden potentiell gefährlichen Verhältnissen wird das zähflüssigere Fluid vom Typ IV zusätzlich als Anti-Icing Mittel im Anschluss an das De-Icing eingesetzt. Es wird unvermischt und kalt auf die Ma-

schinen gesprüht, um sie bis zum Start vor erneuter Vereisung zu schützen (MUC, 2014).

Wie bereits erwähnt, kann aber auch nach dem Start während des Fluges Vereisung auftreten. Voraussetzung dafür ist die Existenz von unterkühltem Flüssigwasser in der Atmosphäre. Kapitel II.2 hat gezeigt, dass Wolkentropfen bei Temperaturen von bis zu -40 °C in der flüssigen Phase existieren können. Trifft ein Flugzeug auf dieses unterkühlte Wasser, setzt der Gefrierprozess der Tropfen an der Maschine ein. Besonders effektiv sind dabei unterkühlte Tropfen, deren Radius $30\text{ }\mu\text{m}$ überschreitet. Sie wurden bisher und werden auch im weiteren Verlauf als Supercooled Large Drops (SLD) bezeichnet. Die Kollisionswahrscheinlichkeit dieser SLD ist deutlich höher als die der kleineren Tropfen, da sie aufgrund ihrer Masse und der damit verbundenen Trägheit seltener der Luftströmung folgen, die sich um das Flugzeug bildet. Außerdem gefrieren sie oft nicht unmittelbar nach der Kollision an der Flügelvorderkante, sondern fließen an den Tragflächen oder am Rumpf entlang und können so auch an den von Enteisungsanlagen ungeschützten Stellen gefrieren. SLD entstehen durch das Aufschmelzen festen Niederschlags in einer eingelagerten Warmluftschicht und der anschließenden Unterkühlung oder in Schichtwolken, die die Voraussetzungen für unterkühltes Wolkenwasser erfüllen (vgl. Kapitel II.4.3). Auch in konvektiven Systemen können aufgrund der hohen Auftriebskräfte noch unterkühltes Flüssigwasser und SLD in hohen und damit kalten Luftschichten auftreten. Somit kann also in höheren Luftschichten die Gefahr von SLD und damit von Flugzeugvereisung bestehen, während am Boden nur die unproblematischen Verhältnisse Regen, Niesel oder kein Niederschlag beobachtet werden können (Bernstein u. a., 1997, 1998). Im Allgemeinen wird bei der Flugzeugvereisung zwischen den vier Eistypen Clear-Ice, Rime-Ice, Mixed-Ice und Hoar-Frost unterschieden. Clear-Ice entsteht, wenn SLD mit einem Flugzeug kollidieren und aufgrund der Freisetzung der latenten Wärme während des Gefrierprozesses erst nach und nach gefrieren. Durch diese Verzögerung wird nur sehr wenig Luft in das Eis eingeschlossen und die Tragfläche wird mit einer klaren, glatten und glasigen Eisschicht überzogen. Sind die unterkühlten Tropfen mit denen die Maschine kollidiert kleiner, entsteht das sogenannte Rime-Ice. Die kleineren Tropfen fließen nicht mit der Strömung nach hinten, sondern gefrieren unmittelbar nach der Kollision. Dabei bleibt die ursprüngliche Tropfenform größtenteils erhalten und im so entstehenden Eis wird viel Luft eingeschlossen. Das Resultat ist eine raue, milchige und kristalline Eisschicht, die sich vor allem an den Vorderkanten der Tragflächen bildet. Da in den meisten Vereisungsfällen Tropfen mit unterschiedlichen Radien beteiligt sind, tritt häufig die Form Mixed-Ice als Mischung aus Clear-Ice und Rime-Ice auf. Wenn sich unkondensierter Wasserdampf direkt als Eis am Flugzeug anlagert, spricht man dagegen von Hoar-Frost. Im deutschen Sprachgebrauch wird diese Vereisungsart als Rauhreif bezeichnet. Sie tritt auf, wenn klare, kalte, windstille und sehr feuchte Verhältnisse herrschen oder wenn ein unterkühltes Flugzeug in eine wärmere und feuchte Luftschicht eintritt. Das kann beispielsweise beim Landungsanflug der Fall sein (CAA, 2000).

II.5.3. Sichtverhältnisse

Neben den Problemen, die die Kontamination von Flughafenflächen und Flugzeugen mit sich bringen, sind schlechte Sichtverhältnisse ein weiteres Charakteristikum des Winterwetters. Hervorgerufen wird es durch die Absorption und Streuung des Lichts im sichtbaren Wellenlängenbereich im dichten Schneefall oder Nebel. In der frühen Entwicklungsphase des WHITE-System wurde die Vorhersage der Sichtverhältnisse aufgrund seiner Komplexität nicht integriert. Weitere intensive Forschungen wären nötig, um zu klären, ob der in dieser Arbeit verwendete Ansatz dafür sinnvoll ist oder ob eventuell ein anderes Vorgehen mehr Erfolg verspricht. Entscheidende Parameter bei der Entstehung von Nebel wie Strahlungsflüsse, Bodenfeuchte oder Windgeschwindigkeit sind oft nicht in ausreichender Qualität oder in Echtzeit verfügbar. Zudem gibt es technische Einrichtungen, die auch einen Betrieb bei schlechten Sichtverhältnissen erlauben. Der Flughafen München besitzt wie jeder größere Verkehrsflughafen ein Instrumentenlandesystem (ILS). Bei schlechter Sicht wird von Sichtflug auf Instrumentenflug umgestellt und der Betrieb kann aufrecht erhalten werden. Dennoch soll an dieser Stelle kurz auf die meteorologischen Eigenschaften dieses Wetterphänomens eingegangen werden.

Ein entscheidender Faktor der Sichtverhältnisse bei Schneefall ist die Niederschlagsrate. Rasmussen & Cole (2002) schlugen sogar vor, aus den Sichtverhältnissen die Intensität des Schneefalls abzuschätzen. Stark vereinfacht gilt dabei: Je intensiver der Niederschlag, desto schlechter die Sicht. Selbstverständlich haben aber auch andere Faktoren Einfluss. Erwähnt werden sollen an dieser Stelle der Flüssigwassergehalt, die Größenverteilung und die Form der festen Niederschlagsteilchen. Dabei kann generell gesagt werden, dass die Sicht umso besser ist, je kompakter und kleiner die Niederschlagsteilchen sind. Schnell fallende, teilweise geschmolzene oder vereiste Partikel sind also weniger problematisch als große aggregierte Schneesterne (Rasmussen u. a., 1999). Auch für den Nebel lassen sich vereinfachte Aussagen treffen. Je höher die Tropfenkonzentration, welche ja abhängig ist von der Übersättigung und der Anzahl der verfügbaren Kondensationskeime, umso stärker der Einfluss des Extinktionskoeffizienten und umso schlechter die Sicht. Die Größe der Nebeltröpfchen variiert im Vergleich zum Schneefall deutlich weniger und spielt bei der Abschätzung der Sichtverhältnisse im Nebel nur eine untergeordnete Rolle (Pruppacher & Klett, 1997).

III. Winterwetter am Flughafen München

Unser Alltag wird vom Wetter beeinflusst. Vor allem im Winter haben kritische Wetterbedingungen vielfältige Auswirkungen. So führen verschneite oder vereiste Verkehrswege regelmäßig zu erheblichen Beeinträchtigungen im Straßen- und Luftverkehr. Oft müssen Vereinbarungen und Pläne an die aktuell herrschenden atmosphärischen Bedingungen angepasst werden. Pünktlichkeit, Effizienz und letztendlich auch die Sicherheit sind den winterlichen Wetterbedingungen maßgeblich unterworfen. Für große Flughäfen ist es elementar, dass sie auf für ihre Region typische Wettersituationen vorbereitet sind. Sorgfältig ausgearbeitete Strategiepläne sorgen dann für einen standardisierten Ablauf der Gegenmaßnahmen. Alle außertropischen Flughäfen müssen dabei zumindest in den Wintermonaten mit mehr oder weniger häufigen Winterwettersituationen rechnen und sie bewältigen können. Der Flughafen München muss sich als einer der führenden Flughäfen in den mittleren Breitengraden während der Wintermonate regelmäßig mit den Konsequenzen des Winterwetters auseinandersetzen.

Wie dieses Kapitel zeigen wird, werden am Flughafen München im langjährigen Durchschnitt etwa 60 Tage mit Winterwetteroperation pro Saison gezählt. Es wird außerdem geschildert, wie der Flughafen auf winterliche Flächenkontaminationen und Flugzeugvereisung reagiert und welche prophylaktischen Maßnahmen ergriffen werden. Der Münchener Flughafen Franz-Josef-Strauß befindet sich seit Mai 1992 im Erdinger Moos. Das Erdinger Moos bildet die Nordspitze und dem am tiefsten liegenden Bereich der Münchener Schotterebene, die sich zwischen den Endmoränen des Inn-, Isar- und Ammergletschers und dem tertiären Hügelland erstreckt. Der Flughafen ist in etwa 26 km in nordnordöstlicher Richtung vom Vorgänger-Flughafen München-Riem, 30 km in nordöstlicher Richtung von München-Stadtmitte, 6.5 km in südöstlicher Richtung von Freising und 9.5 km in nordwestlicher Richtung von Erding entfernt.

III.1. Die Winter der letzten Jahre am Flughafen München

Da der neue Flughafen München seit Mai 1992 existiert, kann erst ab dem folgenden Winter 1992/1993 auf homogene Klimadaten zurückgegriffen werden. Die monatlichen Mittelwerte für die Klimastation am Flughafen werden im sogenannten KL-Standard Format vom Deutschen Wetterdienst zur freien Verfügung gestellt. In der Abbildung III.1 sind die Mittelwerte der Wintermonate Dezember bis März für den Parameter Lufttemperatur sowie die Summe der Niederschlagsmengen und der Sonnenscheindauer dieser Monate gezeigt. WHITE wurde 2012/2013 und 2013/2014 jeweils im Zeitraum von Anfang Dezember bis Ende März quasioperationell betrieben (vgl. Kapitel IV.5). Daten aus dem Winter 2011/2012 wurden verwendet, um die Fuzzy-Sets aufzustellen und das System grundlegend zu kalibrieren (vgl. Kapitel IV.3). Weder für den Winter 2011/2012, noch für den Winter 2012/2013 sind in Abbildung III.1 Auffälligkeiten zu erkennen. Sowohl Temperatur als auch Niederschlagsmenge und Sonnenscheindauer waren im Vergleich zum langjährigen Mittelwert unauffällig. Lediglich die Sonnenscheindauer des Winters 2012/2013 sticht heraus. Sie hat mit etwa 240 Sonnenstunden den geringsten Wert, der für die Wintermonate Dezember bis März am neuen Flughafen bisher beobachtet worden ist. Der Winter 2012/2013 war also der sonnenärmste Winter seit Beginn der Messungen im Jahr 1992. Anders der Winter 2013/2014. Er war mit einer Durchschnittstemperatur von ca. 3.2°C , einer Niederschlagssumme von ca. 85 mm und einer Sonnenscheindauer von ca. 468 h der trockenste, der sonnenreichste und einer der wärmsten Winter seit Beginn der Aufzeichnungen am Flughafen. Zusätzlich zu den frei zugänglichen Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes konnte im Rahmen dieser Arbeit auf interne Auswertungen des Flughafen Münchens zurückgegriffen werden. Monatswerte und Monatsdiagramme verschiedener klimatologischer Parameter wurden von der Verkehrsleitung der FMG bzw. der Luftfahrtberatungszentrale München des DWD genauso zur Verfügung gestellt wie Informationen über Neuschneemengen und saisonale Auswertungen der Bahnsperrrzeiten. Die Daten sind in den Diagrammen der Abbildungen III.2 und III.3 grafisch aufbereitet.

Im Winter 2011/2012 mussten in den Monaten Dezember bis März die Landebahnen an 26 Tagen 93-mal (48 Nord, 45 Süd) gesperrt werden, wobei die summierte Gesamtsperrrzeit 36.5 Stunden (17.4 Nord, 19.1 Süd) betrug. Insgesamt wurden 38.5 cm Neuschnee gemessen, davon allein 22.5 cm im Februar. Der meiste Neuschnee fiel am 14. und 15. Februar in Verbindung mit dem Tiefdruckgebiet Olivia. An diesen beiden Tagen wurden insgesamt 13 cm Neuschnee festgestellt. Die Nordbahn musste in diesem Zeitraum 7-mal für insgesamt 2.6 Stunden gesperrt werden, die Südbahn 6-mal für insgesamt 2.4 Stunden. Mehr als 150 Flüge mussten annulliert werden.

III.1. Die Winter der letzten Jahre am Flughafen München

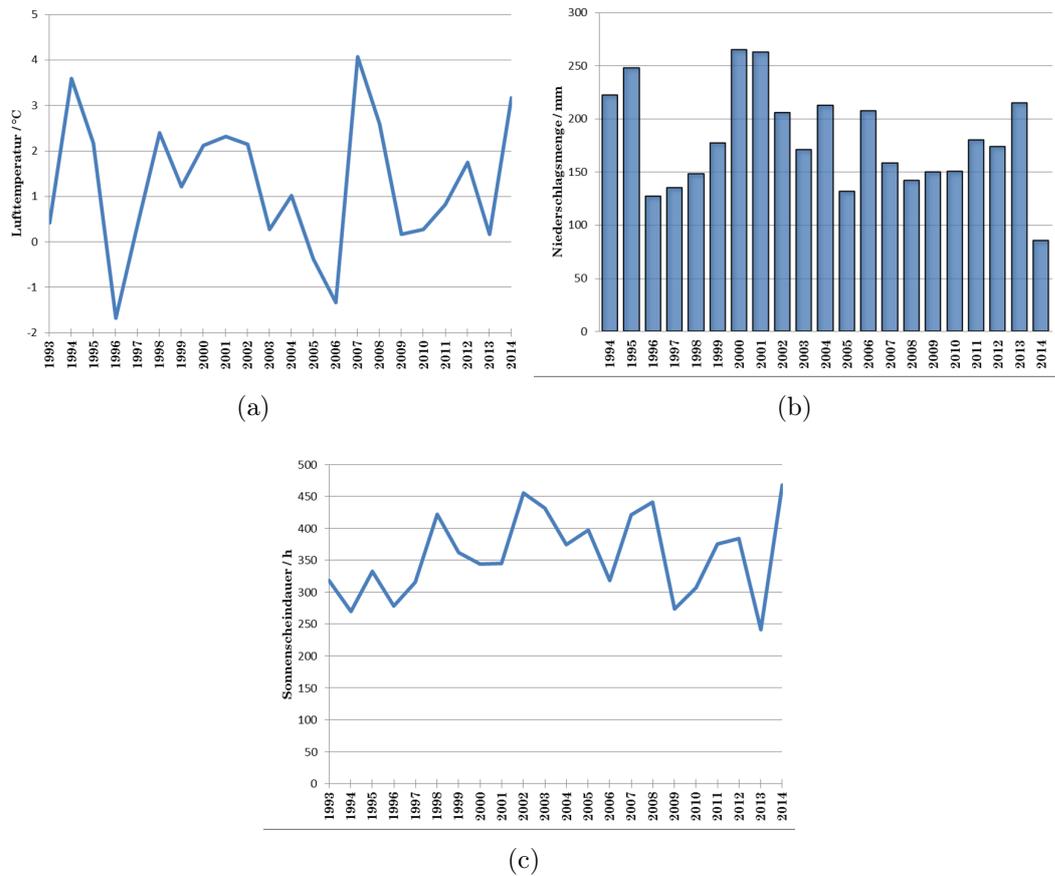


Abbildung III.1.: Klimareihen für den Flughafen München seit der Eröffnung im Mai 1992. Gezeigt sind die mittlere Lufttemperatur (a), die Niederschlagssumme (b) und die Sonnenscheindauer (c) der Monate Dezember bis März. Die Jahreszahl der horizontalen Achse ist jeweils die höhere Jahreszahl jedes Winters. Die langjährigen Mittelwerte dieser Periode sind: 1.3°C (Lufttemperatur), 180 mm (Niederschlagssumme), 358 h (Sonnenscheindauer).

Statistisch gesehen war der Winter 2012/2013 einer der härtesten seit Inbetriebnahme des Flughafens. Die kumulierte Schneehöhe im Zeitraum Dezember bis März belief sich auf insgesamt 107 cm, dabei wurde im Februar mit 50.5 cm der größte Zuwachs verzeichnet. An insgesamt 72 Einsatztagen waren 158 Sperrungen (76 Nord, 82 Süd) der Start- und Landebahnen notwendig. Die Gesamtdauer der Schließungen belief sich auf 65.5 Stunden (31.5 Nord, 34 Süd). Der extremste Tag war der 17. Januar, an dem zwischen 05:00 Uhr und 24:00 Uhr insgesamt 17 Sperrungen (9 Nord, 8 Süd) notwendig waren. Die Dauer der Unterbrechungen des Betriebsablaufs belief sich dabei auf insgesamt 8.6 Stunden (4 Nord, 4.6 Süd). Die Konsequenz waren 307 annullierte und 531 teilweise bis zu zwei Stunden verspätete Flüge.

III. Winterwetter am Flughafen München

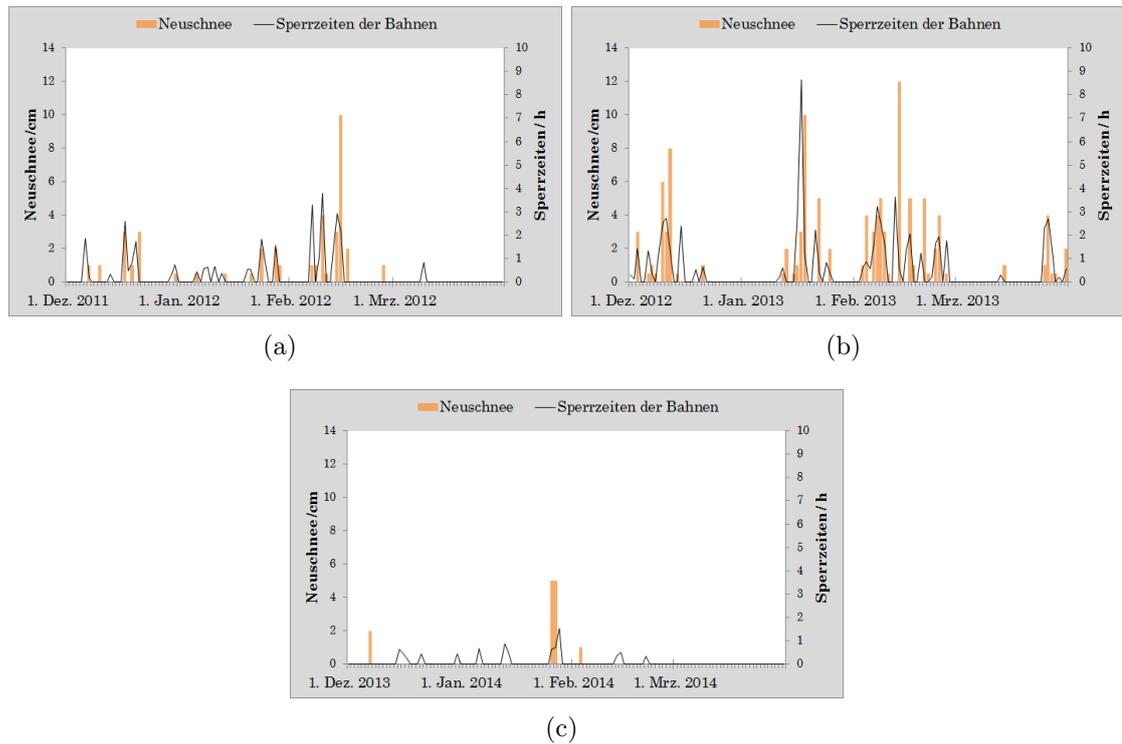


Abbildung III.2.: Statistik über akkumulierte Neuschneemengen und summierte Sperrzeiten beider Bahnen am Flughafen München in den Wintermonaten 2011/2012 (a), 2012/2013 (b) und 2013/2014(c).

Der Winter 2013/2014 brachte nur minimale Beeinträchtigungen mit sich. Insgesamt gab es in den Monaten Dezember bis März lediglich sechs Tage mit Schneedecke am Flughafen. Es wurden im gleichen Zeitraum nur 15 cm Neuschnee registriert. Der maximale Zuwachs wurde im Januar mit 11 cm Neuschnee gemessen, die komplett im Zeitraum 25. bis 27. Januar fielen. Dementsprechend war der Tag mit der längsten akkumulierten Sperrzeit von 1.5 Stunden der 28. Januar 2014, da in der Nacht vom 27. auf den 28. Januar zwischen 02:30 UTC und 05:00 UTC die Nordbahn einmal für 40 Minuten und die Südbahn einmal für 51 Minuten gesperrt und geräumt werden musste. Da in Deutschland zwischen 23:00 UTC und 04:00 UTC ein generelles Nachtflugverbot besteht, hatte dies keine direkten Auswirkungen auf den Betriebsablauf. Insgesamt mussten im Untersuchungszeitraum die Landebahnen an 14 Tagen 25-mal (13 Nord, 12 Süd) gesperrt werden. Die summierte Gesamtsperrzeit betrug 8.3 Stunden (4.0 Nord, 4.3 Süd). Beinahe sämtliche Schließungen fielen in die Nachtstunden zwischen 23:00 UTC und 06:00 UTC. Lediglich am 14. Januar mussten die Bahnen zwischen 18:33 UTC und 19:45 UTC jeweils für ca. 15 Minuten geschlossen werden.

In der Enteisungssaison, die jeweils vom 1. Oktober bis zum 30. April dauert, wurden im Winter 2011/2012 für 9134 Enteisungsvorgänge ca. 4 Millionen Liter vom

Enteisungsfluid Typ I und ca. 1 Million Liter vom Enteisungsfluid Typ IV benötigt. 7724 der 9134 Enteisungsvorgänge mussten in den Monaten Dezember bis März durchgeführt werden, wobei der Januar mit 2747 enteisten Maschinen der arbeitsreichste Monat war. In der Enteisungssaison 2012/2013 mussten Flugzeuge an 169 Tagen enteist werden, dabei summierte sich die Anzahl der enteisten Flugzeuge insgesamt auf 14672. Benötigt wurden ca. 7.8 Millionen Liter Flugzeugenteisungsmittel vom Typ I und ca. 2.2 Millionen Liter vom Typ IV. In die Monate Dezember bis März fielen mit 13096 Enteisungen etwa 89 Prozent der Vorgänge. Arbeitsreichster Monat war der Februar mit 4845 enteisten Maschinen, der arbeitsreichste Tag der 26. März mit 471 Enteisungen. 95 Prozent aller Enteisungsvorgänge wurden dabei auf den Remote-Flächen an den Startbahnköpfen durchgeführt, die restlichen 5 Prozent auf dem Vorfeld (EFM, 2013a). In den Wintermonaten der Saison 2013/2014 wurden bei insgesamt 5728 Enteisungsvorgänge ca. 1.9 Millionen Liter Flugzeugenteisungsmittel vom Typ I und 0.4 Millionen vom Typ IV verbraucht. 99.3 Prozent aller Vorgänge konnten dabei auf den Remote-Flächen an den Startbahnköpfen durchgeführt werden. In die Monate Dezember bis März fielen mit 4798 Enteisungen etwa 84 Prozent aller Vorgänge, wobei der Dezember mit 1952 Enteisungen der arbeitsreichste Monat und der 06. Dezember mit 274 Enteisungen der arbeitsreichste Tag war. Lediglich an 17 Tagen mussten mehr als 100 Flugzeuge enteist und nur an 13 Tagen musste in nennenswertem Umfang (>10000 Liter) Typ IV zum Schutz vor Wiedervereisung eingesetzt werden. Insgesamt war der Einsatz von Typ IV und damit Enteisungen im Two-Step-Verfahren bei 25 Prozent aller Enteisungen erforderlich. Im Vorjahr waren es noch 56 Prozent und es mussten an 52 Tagen mehr als 100 Flugzeuge enteist und an 47 Tagen Enteisungsmittel Typ IV in nennenswertem Umfang eingesetzt werden (EFM, 2014).

III.2. Strategie gegen winterliche Flächenkontaminationen

Der Flughafen München in Person der Mitarbeiter der Flughafen München GmbH, welche für die Organisation der Winterwetteroperationen verantwortlich sind, ist stets daran interessiert, in wissenschaftlicher und technischer Hinsicht auf dem neuesten Stand zu sein. Bei im Schnitt 90 Flügen pro Stunde und etwa 1200 Bewegungen am Tag kann jede minimale Störung des Ablaufs weitreichende Konsequenzen bedeuten (MUC, 2013). So hat man dort immer ein offenes Ohr für wissenschaftliche Neuerungen und forciert auch eigene Projekte, um die Identifikation und Prognose potentiell problematischer Situationen zu optimieren. Ein Beispiel dafür ist das Projekt eines automatisierten Systems, das den Trend und den aktuellen Zustand der Bodenverhältnisse berechnen soll. Dabei soll durch Kombination der empirisch ermittelten Reibungskoeffizienten mit den bei der Landung berechneten Bremskoeffizienten der Flugzeuge, den aktuellen atmosphärischen Bedingungen

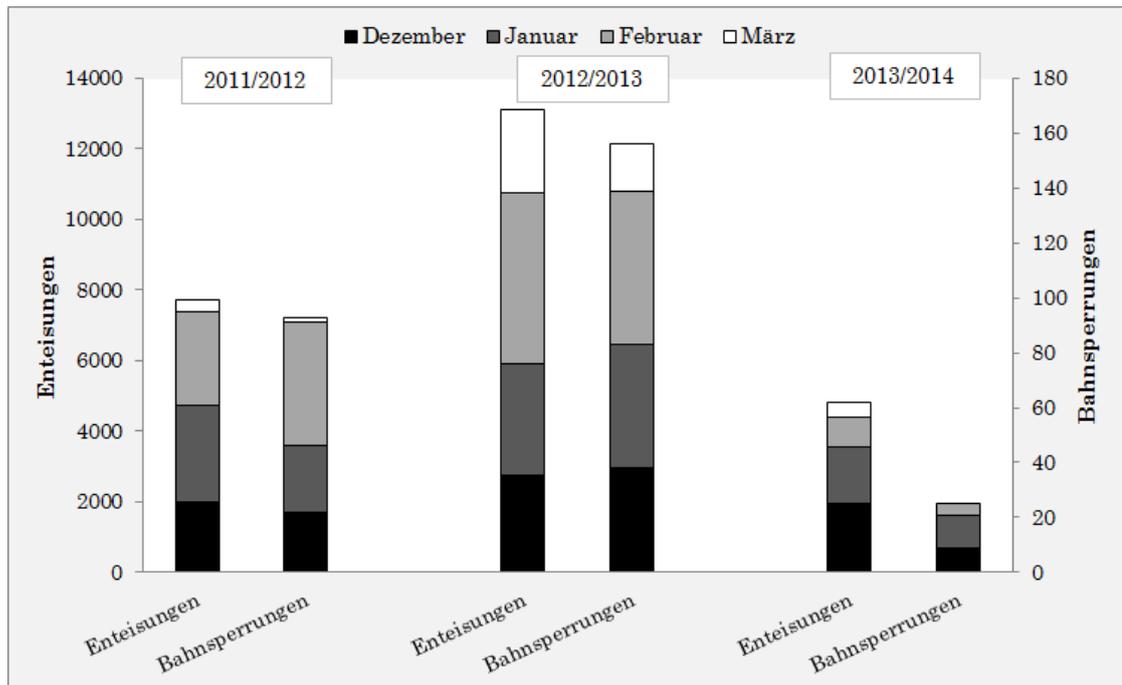


Abbildung III.3.: Statistik der Enteisungen und Bahnsperren am Flughafen München in den Wintermonaten 2011/2012, 2012/2013 und 2013/2014.

und den Messungen neuartiger Bodensensoren die in vielen Fällen auftretende Diskrepanz zwischen gemessenem Reibungswert und Bremsverhalten der Maschinen minimiert werden (Simon, 2012). Derzeit wird über die wetterbedingte Schließung einer Landebahn nach der Ermittlung des Reibungskoeffizienten durch Testfahrten entschieden. In den entsprechenden Situationen werden diese Testfahrten regelmäßig durchgeführt. Die Messungen und Vorhersagen der Flugwetterberatung des Deutschen Wetterdienstes inklusive der Sichtweite, des Niederschlagtyps und der Niederschlagsintensität und die Messungen der Bodenverhältnisse und der Kontaminationshöhe sind dabei zusätzliche Informationsquellen. Am Flughafen München wird eine Landebahn beispielsweise geschlossen, wenn mehr als 25 Prozent ihrer Fläche mit mehr als 15 mm Wasser, Schneematsch oder nassem Schnee bzw. mehr als 60 mm trockenem Schnee bedeckt sind (MUC, 2012). Die Testfahrten zur Ermittlung der Reibungskoeffizienten werden am Flughafen München durch einen erfahrenen Mitarbeiter der Verkehrsleitung mithilfe eines *SARSYS friction tester* (SARSYS, 2014) durchgeführt. Dieses Messgerät ist in München in drei Fahrzeugen vom Typ Saab 9-5 und in einem Fahrzeug vom Typ Saab 9000 eingebaut (vgl. Abbildung III.4(a)). Die Messung wird jeweils durch ein in den Kofferraum des Fahrzeugs installiertes Messrad realisiert, das während einer Testfahrt nach unten ausgeklappt wird und dessen Gummiprofil dem der Flugzeuge entspricht (vgl. Abbildung III.4(b)). Empfindliche Sensoren am Messrad erfassen die Griffigkeit bei verschiedenen Geschwindigkeiten sowie bei Bremsversuchen und übermitteln die



(a) Saab Testfahrzeug



(b) SRSYS Friction Tester



(c) Kontrolleinheit

Abbildung III.4.: Testfahrzeug des Flughafen Münchens zur Ermittlung der Reibungskoeffizienten. Abbildungen aus Simon (2010).

Reibungswerte an eine im Cockpit des Fahrzeugs installierte Kontrolleinheit (vgl. Abbildung III.4(c)). Der Vorteil dieses Systems im Vergleich zu anderen Messgeräten ist seine Zuverlässigkeit. Zudem lassen sich die Fahrzeuge besser steuern als zum Beispiel in Anhänger integrierte Messgeräte (Skidometer) und erlauben eine hohe Anzahl an Messungen innerhalb kürzester Zeiträume. Der Einsatz auf den Pisten und die damit verbundene Sperrung kann so in der Regel auf ca. 3-5 Minuten begrenzt werden (Simon, 2010). Die gemessenen Reibungskoeffizienten werden in Verbindung mit den Oberflächenbedingungen der Bahnen nach Richtlinien der International Civil Aviation Organisation (ICAO) in festgelegte Bremswerte eingeteilt. Die Klassifikation und Kodierung der Bremswirkung sind zu sehen in Tabelle II.3 (in Kapitel II.5.1). Sie gelten jeweils für ein Drittel einer Bahn und werden unter anderem per Funk der für die Koordinierung der Starts und Landungen verantwortlichen Deutschen Flugsicherung (DFS) mitgeteilt. Außerdem werden sie im SNOWTAM und in der Runway State Group (RSG) als Erweiterung von METAR veröffentlicht. Wenn nun die Bremswirkung auf zwei Dritteln einer Landebahn als *Poor* oder auf einem Drittel der Bahn als *NIL* klassifiziert wird, muss die Bahn geschlossen und geräumt werden, bevor weitere Starts oder Landungen durchgeführt werden dürfen. Alle Informationen über das Wetter einschließlich der Messungen und Vorhersagen werden von der Luftfahrtberatung des Deutschen Wetterdienstes auf der Webseite *Airport Briefing Area – LBZ Süd* zusammengetragen. Der zuständige Verkehrsleiter entscheidet anhand dieser Informationen, ob

Winterdienstmannschaften aktiviert werden müssen. Oberste Priorität hat beim Winterdiensteinsatz naturgemäß die Räumung der Start- und Landebahnen. Ebenfalls besonders wichtig ist die Säuberung der Gleitpfadsender, die die Piloten vor allem bei schlechten Sichtverhältnissen im Instrumentenanflug unterstützen. Die Rollbahnen, die Vorfeldflächen und die Zufahrtsstraßen haben eine geringere Prioritätsstufe. Im Ernstfall kann eine Bahn von mehreren koordiniert arbeitenden Räummannschaften innerhalb einer halben Stunde von Schnee befreit oder innerhalb von 12 Minuten enteist werden. Bei anhaltenden widrigen Bedingungen werden beide Bahnen im Wechsel geschlossen und geräumt. So wird versucht den Betrieb so weit wie möglich aufrecht zu erhalten. Der Einsatz des Winterdienstes auf den Vorfeldbereichen ist unabhängig von den Operationen auf den Bewegungsflächen und läuft parallel zum normalen Betrieb.

Prophylaktische Maßnahmen, wie das Ausstreuen von Salz vor dem Einsetzen von Winterwetter, werden am Flughafen München nicht durchgeführt. Salz hat auf die metallenen Flugzeugteile eine korrosive Wirkung und deshalb ist sein Einsatz auf Flughäfen generell nicht zugelassen. Die Mitarbeiter des Winterdienstes am Münchner Flughafen sind in den Wintermonaten vom 1. November bis zum 30. April in Rufbereitschaft. Im Falle eines prognostizierten Winterwetter Szenarios werden die Einsatzkräfte rechtzeitig alarmiert und können bei Einsetzen der Gefahrensituation sofort reagieren. Allerdings ist nur ein Bruchteil der Winterdienstmitarbeiter beim Flughafen in Vollbeschäftigung angestellt und vor Ort stationiert. Ein großer Teil sind externe Mitarbeiter, die teilweise ihre eigene Ausrüstung am Flughafen deponieren und im Schichtdienst vom 1. November bis zum 15. April auf Abruf bereit stehen. Diese Gruppe setzt sich hauptsächlich aus Landwirten der näheren Umgebung zusammen, die sich in kleinen Gruppen organisieren und so eine Gerätschaft für den Winterdienst am Flughafen zur Verfügung stellen können (Röhner & Hauf, 2008). Im Ernstfall können so weitere Kräfte innerhalb einer Stunde die vorhandenen Mannschaften unterstützen. Auch wegen dieser Vorlaufzeit ist eine exakte kurzfristige Vorhersage von Winterwetter für den Flughafen von großer Bedeutung. Für die Einsätze stehen insgesamt mehr als 100 Spezialfahrzeuge wie Schneepflüge, Schneefräsen, Kehrblasgeräte und Streumaschinen bereit. Der gesammelte Schnee wird dann von Transportfahrzeugen auf eine der sechs vorhandenen Schneedeponien mit einer Gesamtkapazität von 87747 m³ befördert (MUC, 2012). In der Karte in Abbildung III.5 sind sowohl die Schneedeponien eingezeichnet als auch die Rollfelder, die Vorfeldflächen, der Tower, in dem sich DFS und Flugwetterberatung aufhalten, und die Einsatzzentrale des Winterdienstes.

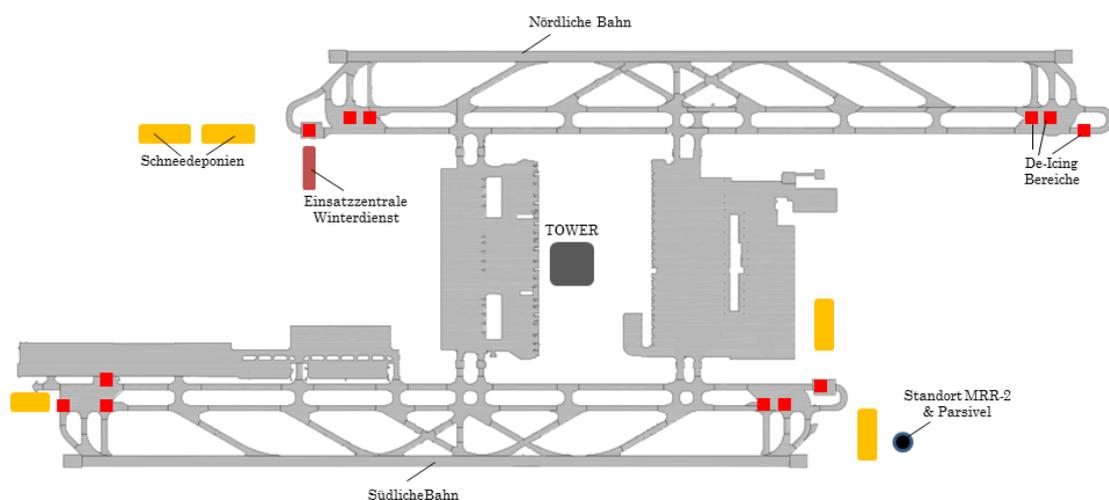


Abbildung III.5.: Übersichtskarte Flughafen München

III.3. Strategie gegen Flugzeugvereisung

Nach dem Clear-Aircraft-Prinzip darf eine Maschine nur dann starten, wenn ihre Tragflächen und ihr Rumpf von Eis und Schnee befreit sind. Während einer Winterwettersituation müssen Flugzeuge vor dem Start enteist und eventuell gegen eine erneute Vereisung geschützt werden. Wie die Karte in Abbildung III.5 zeigt, existieren am Flughafen München zu diesem Zweck zwölf De-Icing Bereiche. Sie befinden sich jeweils an den Enden der Startbahnen, sodass je nach Abflugrichtung maximal sechs gleichzeitig betrieben werden können. In diesen Bereichen werden Flugzeuge direkt vor dem Start von Kontaminationen befreit und falls notwendig mit Anti-Icing Mitteln behandelt. Durchgeführt werden die Arbeiten von der EFM GmbH (Gesellschaft für Enteisen und Flugzeugschleppen am Flughafen München mbH), einem gemeinsamen Tochterunternehmen der Flughafen München GmbH und der Lufthansa. Die Verantwortung und die Koordination der Flugzeugenteisungen liegen zusätzlich in den Händen der zuständigen Piloten (EFM, 2013b). Muss ein Flugzeug enteist werden, sprechen sich Flugzeugbesatzung und Enteisungsfirma direkt ab. Die Verkehrsleitung in ihrer Funktion als zuständige Luftfahrtbehörde ordnet nur im Extremfall die Enteisung einer Maschine an. Jeder der Enteisungsbereiche ist mit mehreren Enteisungsfahrzeugen besetzt. So können dort 95 Prozent aller Enteisungsvorgänge durchgeführt werden. Ein Vorteil dieser Bereiche ist, dass die Flugzeuge wegen der Nähe zur Startbahn innerhalb kürzester Zeit nach der Enteisung starten können und die Vorhaltezeit der Anti-Icing Mittel nicht überschritten wird. Wie wichtig die Einhaltung der Vorhaltezeit ist, zeigt der Absturz einer McDonnell Douglas DC-9-14 am 15.11.1987 kurz nach dem Start auf dem Stapleton International Airport Denver, bei dem 28 Personen getötet und weitere 51 verletzt wurden. Die Maschine wurde zwar vor dem



Abbildung III.6.: *Flugzeugenteisung am Flughafen München. Abbildungen aus MUC (2014).*

Start mit Enteisungsmitteln behandelt, allerdings war durch einen verzögerten Start die Vorhaltezeit des Mittels überschritten. Im starken Schneefall lagerte sich auf der Maschine erneut eine Kontaminationsschicht an, die letztlich die Ursache für den Absturz war (NTSB, 1988; Rasmussen u. a., 1993). Ein weiterer Vorteil der Enteisungsbereiche ist, dass das versprühte Enteisungsmittel in diesen Bereichen aufgefangen und in einer Recyclinganlage wiederaufbereitet werden kann. Am Flughafen München dauert die offizielle Enteisungssaison vom 1. Oktober bis zum 30. April. Muss ein Flugzeug außerhalb dieser Saison enteist werden, zum Beispiel aufgrund des Coald-Soak-Effekts (siehe Kapitel II.5.2), wird dies nicht in den DE-Icing-Bereichen durchgeführt, sondern an der Parkposition der Maschine. Gleiches gilt das ganze Jahr über für Propellerflugzeuge, die über keine Propellerbremse verfügen und für spezielle Enteisungsvorgänge wie der Säuberung der Tragflächenunterseite oder der Triebwerke. Die Enteisung der Triebwerke wird dabei mit Heißluft aus der Abwärme der Recyclinganlage durchgeführt. Die EFM verfügt über eine Enteisungsflotte von 27 Fahrzeugen mit drei unterschiedlichen Typen. Diese Fahrzeuge können mit bis zu 8000l Enteisungsmittel betankt werden und schaffen bis zu 68 Enteisungsvorgänge pro Stunde (MUC, 2014).

IV. Das WHITE-System

Die Bewältigung und Vorhersage von Winterwettersituationen ist ein Thema, das Forscher in aller Welt seit langer Zeit beschäftigt. Nicht nur Flughäfen, sondern auch Straßenbetriebsdienste und im Prinzip alle Verkehrsteilnehmer können mit einer möglichst genauen Kenntnis des Wetters ihre Einsätze und ihren Alltag zuverlässiger konzipieren. Neben der Planungssicherheit motivieren natürlich auch die Sicherheitsaspekte und sorgen für ein breites Spektrum an Forschungsarbeiten mit unterschiedlichsten Ansätzen zu den Themen Vorhersage von winterlichem Niederschlag und Analyse von Vereisungssituationen. Im Fokus dieser Arbeit liegt die Entwicklung eines Nowcasting-Systems für den Flughafen München. Unter dem Akronym WHITE (Winter Hazards In Terminal Environment) werden problematische Winterwetterszenarien analysiert und für die folgenden zwei Stunden vorhergesagt. Neben dem Nowcasting-System wurde für WHITE ein Participatory-Sensing-Konzept entwickelt und realisiert. In diesem Kapitel werden das Konzept, die Methodik und die Eigenschaften beider Elemente von WHITE ausführlich beschrieben sowie die Leistungsfähigkeit des Systems während zweier Kampagnen in den Wintermonaten 2012/2013 und 2013/2014 beurteilt. Zuvor wird in den Kapiteln IV.1 und IV.2 ein Überblick über vergleichbare inspirierende Literatur und über die bisherige Winterwetterforschung am Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt präsentiert.

IV.1. Winterwetterforschung am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre

Am DLR-Forschungsinstitut für Physik der Atmosphäre wird an verschiedenen atmosphärischen Aspekten geforscht, die Bezug zu Winterwetter haben. In diesem Kapitel werden Forschungsarbeiten des Instituts vorgestellt, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Es werden diverse Messgeräte und ihre Anwendung für die Winterwetterforschung sowie Arbeiten zur Wolkenphysik, zur Vereisungsforschung, zur meteorologischen Anwendung von Fuzzy-Logik und zur Entwicklung von Wetterobjekten skizziert.

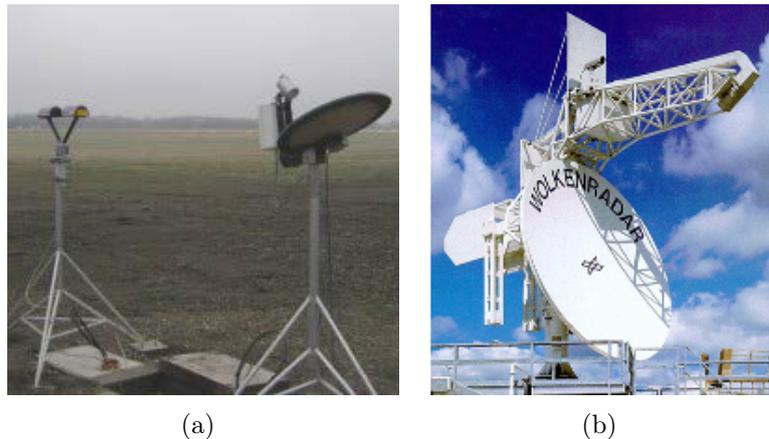


Abbildung IV.1.: (a): DLR Beobachtungsinstrumente MRR-2 (rechts) und Parsivel (links) am Flughafen München. Abbildung aus Hagen (2012). (b): POLDIRAD auf dem Dach des DLR-Instituts für Physik der Atmosphäre in Oberpfaffenhofen. Abbildung aus Hagen (2014c).

IV.1.1. Beobachtungsinstrumente

Seit Dezember 2010 betreibt das DLR-Institut für Physik der Atmosphäre die Messgeräte MRR-2 und Parsivel am Flughafen München. Der aktuelle Standort der Instrumente ist der Karte in Abbildung III.5 zu entnehmen. Zusätzlich ist an dieser Stelle das polarimetrische Doppler Radar POLDIRAD erwähnt.

IV.1.1.1. Mikro-Regen-Radar 2 (MRR-2)

Das Mikro-Regen-Radar 2, hergestellt von der Firma Metek, ist ein vertikal gerichtetes aktives Doppler Radar, das mit einer Frequenz von 24 GHz betrieben wird (METEK, 2009). Es erfasst das Geschwindigkeitsspektrum fallender Hydrometeore. Daraus können Niederschlagsrate und Größenverteilung als Vertikalprofile abgeleitet werden. Aktuell betreibt das DLR-Institut für Physik der Atmosphäre zwei Geräte. Eins steht am Flughafen München, das andere ist installiert am Flugplatz Ingolstadt-Manching (Hagen, 2014a,b). Die Anschaffung und Inbetriebnahme weiterer Geräte ist geplant. Ein aktuelles Forschungsthema in der Abteilung Verkehrsmeteorologie ist die Entwicklung einer Niederschlagsklassifikation basierend auf den vom MRR-2 gemessenen Größen (Hagen, 2012; Imhof & Hagen, 2012). Für die Evaluierung der Ergebnisse von WHITE sind die Messungen der Geräte wertvolle Zusatzinformationen. Vor allem die Werte des Geräts am Flughafen München eignen sich gut, um die Analysen und Prognosen von WHITE anhand von Fallstudien mit verlässlichen Beobachtungen zu vergleichen.

IV.1.1.2. Parsivel

Das von der Firma Ott hergestellte optische Disdrometer Parsivel misst die Größe und die Geschwindigkeit von Niederschlagsteilchen, die durch einen horizontal gerichteten Laserstrahl fallen. Die Niederschlagspartikel können dadurch laut Hersteller (Ott, 2014) in die Klassen Niesel, Niesel mit Regen, Regen, Regen/Niesel mit Schnee, Schnee, Schneegriesel, Graupel und Hagel eingeteilt werden. Zudem lassen sich so Niederschlagsintensität, Radarreflektivität und Sichtweite abschätzen. Das DLR-Institut für Physik der Atmosphäre betreibt zwei Parsivel Geräte parallel zu den Mikro-Regen-Radar-Geräten der Firma Metek. Sie befinden sich jeweils in direkter Nachbarschaft am Flughafen München und am Flugplatz Ingolstadt/Manching (Hagen, 2012). Auch die Ergebnisse der Parsivel Disdrometer eignen sich in Fallstudien, um die Ergebnisse von WHITE mit Punktmessungen zu vergleichen.

IV.1.1.3. POLDIRAD

Seit 1986 wird vom DLR-Institut für Physik der Atmosphäre ein Polarisations Doppler Radar (POLDIRAD) betrieben. Die Hauptcharakteristika des nicht operationell arbeitenden C-Band Forschungsradars sind seine Polarisations-eigenschaften. Da flüssige und feste Niederschlagsteilchen ein unterschiedliches Rückstreuverhalten für unterschiedlich polarisierte elektromagnetische Wellen besitzen, ist es möglich Niederschlagsteilchen nach ihrem Typ zu klassifizieren. Beispiele für Arbeiten, welche die Klassifikation behandeln, sind die Veröffentlichungen von Höller u. a. (1994) sowie Hagen & Dalphiné (2012). Ein Hauptproblem für die Untersuchung des Niederschlags am Flughafen ergibt sich allerdings aus der Orographie des Geländes. POLDIRAD befindet sich auf dem Dach des DLR-Instituts auf 603 m ü. N.N., während der Flughafen im Erdinger Moos auf ca. 445 m ü. N.N. liegt. Um störende Bodenechos zu vermeiden, muss der Radarstrahl zudem einen Elevationswinkel von mindestens 0.5° besitzen. Am ca. 50 km entfernten Flughafen kann also etwa der unterste Kilometer der Atmosphäre nicht vom Radarstrahl abgedeckt werden. Wichtig ist deshalb vor allen Dingen die Identifikation der Schmelzschicht, die in den dreidimensionalen Radardaten als helles Band mit höheren Reflektivitäten zu erkennen ist, um auch in den vom Radargerät weiter entfernt liegenden Regionen eine Aussage über den Niederschlagstyp in Bodennähe treffen zu können. POLDIRAD ist zudem beispielsweise in der Lage die Niederschlagsintensität und das 3-dimensionale Strömungsfeld in einem Niederschlagsgebiet zu quantifizieren (Hagen, 2014c). Da POLDIRAD mit einer maximalen Reichweite von 300 km nicht das komplette Untersuchungsgebiet von WHITE (vgl. Abbildung IV.35) erfasst und Messungen nicht operationell durchgeführt werden, ist eine Integration in das System nicht möglich. Die Messungen eignen sich aber gut, um die Ergebnisse des Systems anhand von Fallbeispielen zu untersuchen.

IV.1.2. Vereisungsforschung am DLR

Die Erforschung von Vereisung in Wolken und der mikrophysikalischen Eigenschaften der Wolkenentstehung haben eine lange Tradition am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre. So wurden bereits im Jahr 1989 verschiedene wolkenphysikalische Parameter auf ihre Höhenabhängigkeit untersucht (Hoffmann & Roth, 1989). Hoffman & Demmel (1990) analysierten die Ergebnisse dreier DLR-Testflüge, die von heftiger Vereisung betroffen waren. Auch die fernerkundungsgestützte Identifikation von Vereisungswolken war ein Forschungsthema in dieser frühen Phase (Schickel u. a., 1992). Hauf (1993) diskutierte die Idee eines Warnsystems vor Vereisung. Diese Idee wurde zum Beispiel von Tafferner u. a. (1998) aufgegriffen und resultierte in der Entwicklung des ADWICE Systems (siehe Kapitel IV.1.2.1). Im Zuge des internationalen EURICE (European Research for Aircraft Ice Certification) Projektes wurden die Forschungen am Institut intensiviert. Dabei wurden vor allem die meteorologischen Bedingungen im Falle von Vereisung behandelt (Hauf & Brown, 1998), aber auch die Flugzeugvereisung bei in Stratuswolken eingelagerten konvektiven Zonen untersucht (Hauf & Schröder, 2006; Hauf u. a., 1999). Die Durchführung einer Flugmesskampagne stand ebenfalls im Fokus des Projekts und führte zu den Veröffentlichungen von Hauf & Schröder (1998) und Schröder u. a. (2000). Der generelle Einfluss von Wetter auf den Verkehr und eine kurze Zusammenfassung der Vereisungsproblematik wurden in Hauf u. a. (2002, 2004) veröffentlicht.

IV.1.2.1. ADWICE

Der Eisansatz während des Fluges kann vor allem bei kleineren Flugzeugen die Strömungs- und Gewichtsverhältnisse der Maschine signifikant modifizieren und stellt ein wesentliches Risiko für die Sicherheit der betroffenen Maschine dar. Zahlreiche Flugunfälle und -vorfälle, die auf Vereisung der Maschinen zurückzuführen sind, belegen die Gefahr, die von Flugzeugvereisung ausgeht. Sie weckten den Wunsch nach einer exakteren und detaillierten Diagnose und Prognose von Vereisungsregionen. So wurden als Folge des Absturzes einer ATR-72 im Oktober 1994 in Roselawn, Indiana, am National Center for Atmospheric Research (NCAR) unter anderem der Integrated Icing Diagnostic Algorithm (IIDA) und der Integrated Icing Forecast Algorithm (IIFA) entwickelt, um die Diagnose und Vorhersage von Vereisungssituationen zu verbessern. Auf Grundlage dieser Algorithmen entstand am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und dem Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover (IMUK) das Nowcasting-System ADWICE (Advanced Diagnosis And Warning System For Aircraft Icing Environments) zur Erkennung vereisungsgefährdeter Lufträume. Vereisungsgefährdete Lufträume werden in ADWICE definiert über das Vorkommen von großen

unterkühlten Tropfen (SLD) (Tafferner u. a., 2003).

ADWICE besteht aus zwei Hauptelementen. Durch das erste Element wird auf Grundlage der Vorhersagen eines Numerischen Wettermodells ein Prognoseprodukt für alle Vorhersagezeiten berechnet. In der operationellen Version wird dafür das europaweite Regionalmodell COSMO-EU mit einer horizontalen Auflösung von ca. 7km verwendet. Das zweite Hauptelement berechnet durch eine Kombination mehrerer Datenquellen stündlich ein Diagnoseprodukt. Modellvorhersagen aus COSMO-EU, aktuelle Beobachtungen der Wettersituation, der Wolkenbedeckung und der Wolkenhöhe sowie Radardaten des europaweiten Komposits werden dabei kombiniert.

PIA – Prognostischer Vereisungsalgorithmus Auf Grundlage von Temperatur- und Feuchteprofilen und auf Basis von Konvektionsparametern detektiert PIA potentielle Vereisungsgebiete im Modellgitter. Vier verschiedene Vereisungsszenarien, die auf unterschiedlichen Entstehungsprozessen von SLD beruhen, sind dafür definiert. Das Vereisungsszenario *freezing* berücksichtigt den typischen Entstehungsprozess von unterkühltem Regen mit eingelagerter Schmelzschicht. Im Szenario *stratiform* wird der Entstehungsprozess von warmen Regen ohne Transformation in die Eisphase in Betracht gezogen. Ein drittes Vereisungsszenario *convective* berücksichtigt die Entstehung von unterkühltem Flüssigwasser in hochreichenden konvektiven Wolkensystemen. Das vierte Szenario fasst alle restlichen Gebiete mit Temperaturen zwischen -20°C und 0°C und einer hohen relativen Feuchte in der Klasse *general* zusammen.

DIA – Diagnostischer Vereisungsalgorithmus Im Gegensatz zum Prognoseteil basiert das diagnostische Element von ADWICE nicht hauptsächlich auf Modelldaten. Ausgangslage sind Beobachtungen von Wetterstationen und Radardaten. Deutet das beobachtete Wetter auf ein Vereisungsszenario in der Luftsäule darüber hin, wird für das Gebiet, für das die Station repräsentativ ist, in den Modellprofilen nach potentiellen Vereisungsschichten gesucht. Die Einteilung und Definition der Vereisungsszenarien *freezing*, *stratiform*, *convective* und *general* bleiben dabei erhalten.

IV.1.3. Fuzzy-Logik und Wetterobjekte

Neben der Vereisungsforschung wird am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre generell der Einfluss von widrigen Wetterbedingungen auf den Verkehr untersucht. Unter anderem im Projekt Wetter & Fliegen wurden Arbeiten veröffentlicht, die den Einfluss mithilfe einer auf Fuzzy-Logik basierenden Fusion unterschiedlicher Daten untersuchen und eine Bewertung anhand von Wetterobjekten vorstellen

(Forster & Tafferner, 2012; Gerz u. a., 2012b; Tafferner & Keis, 2012; Tafferner u. a., 2012). Wetterobjekte haben den Vorteil, dass komplexe Wetterinformationen auf eine geringe Datenmenge reduziert werden, die anschaulich dargestellt und von den Nutzern der Systeme einfach und schnell erfasst werden können. Die Arbeiten im Projekt Wetter & Fliegen bilden die Basis für die Entwicklung des WHITE-Systems. Weitere verwandte Arbeiten, die den Fuzzy-Logik-Ansatz aufgreifen sind Stich u. a. (2013) und Köhler & Tafferner (2013).

IV.2. Winterwetterforschung in der internationalen Fachliteratur

Wie bereits angesprochen, existiert ein breites Spektrum an Forschungsarbeiten zum Thema Winterwetter. An dieser Stelle sollen einige Arbeiten, die einen inspirierenden Einfluss auf die Entwicklung von WHITE hatten, angesprochen werden, um die Grundideen von WHITE besser verstehen und um die vorliegende Arbeit in einem größeren Umfeld einordnen zu können.

Das im vorherigen Kapitel bereits erwähnte Nowcasting-System ADWICE von Tafferner u. a. (2003) wurde am Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover zum Beispiel in Person von Leifeld (2004) und Roloff (2014) weiterentwickelt. Es wird im Moment von den Luftberatungszentralen des DWD zur Beratung von Berufs-, Hobby- und Sportpiloten eingesetzt und für die Einsatzplanung von Bundeswehr-Hubschraubern genutzt (Roloff u. a., 2013). Grundlage für die Entwicklung von ADWICE sind neben den am DLR erfolgten Arbeiten unter anderem die Veröffentlichungen über SLD und Flugzeugvereisung von Sand u. a. (1984), Huffman & Norman (1988) und Politovich (1989). Außerdem werden dort die Erkenntnisse von Rauber & Tokay (1991), Cober u. a. (1995), Politovich & Bernstein (1995), McCann (1997) und Bernstein u. a. (1997) berücksichtigt. In diesen Arbeiten werden Wettersituationen identifiziert, in denen es bevorzugt zu Flugzeugvereisung kommen kann. Die Publikationen von Strapp u. a. (1996), Stuart & Isaac (1999), Bernstein u. a. (1998), Bernstein (2000), Rauber u. a. (2000) und Carriere u. a. (2000) beschäftigen sich mit dem Auftreten von gefrierenden Niederschlägen und ihren regionalen Charakteristika und haben ebenso Bedeutung für die Entwicklung von ADWICE wie die qualitative Beurteilung verschiedener Parameter und ihrem Nutzen für die Vereisungsvorhersage (z.B. Thompson u. a. 1997, Carriere u. a. 1997, McDonough & Bernstein 1999 und Guan u. a. 2001).

Parallel zur Entstehung der Vereisungsalgorithmen am DLR wurden am National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder, Colorado, die Systeme Current Icing Potential (CIP) (Bernstein u. a., 2005) und Forecast Icing Potential

(FIP) (McDonough u. a., 2004) zur Analyse und Vorhersage potentieller Vereisungsgebiete entwickelt. Durch die Differenzierung unterschiedlicher Szenarien ähnelt der Ansatz dieser Systeme dem von ADWICE, allerdings ist hier bereits eine übersichtliche Fuzzy-Logik implementiert, um Vereisungsgebiete zu identifizieren. Auch die in Bernstein u. a. (2005) erwähnte zugrundeliegende Literatur unterscheidet sich inhaltlich nicht signifikant von der aus Tafferner u. a. (2003). Fallstudien von Rasmussen u. a. (1995) und Marwitz u. a. (1997) über Flugzeugunfälle in Verbindung mit Vereisung und von Rasmussen u. a. (1992) und Isaac u. a. (2001) über Forschungsflüge in Vereisungsgebieten helfen dabei aus Modell- und Beobachtungsdaten zuverlässige Information über Vereisungsbedingungen abzuschätzen. Wie in ADWICE wird auch im CIP/FIP versucht, durch Kombination unterschiedlicher Datenquellen bestmögliche Ergebnisse zu erzielen. So werden die Kombinationen unterschiedlicher Modellparameter von Schultz & Politovich (1992), Reisner u. a. (1998), Tremblay & Glazer (2000) und Thompson u. a. (2004) genauso berücksichtigt wie die auf Satellitenbeobachtungen beruhenden Techniken von Ellrod (1996), Lee u. a. (1997) und Smith u. a. (2002). Auch die Veröffentlichungen von Reinking u. a. (1997) und Vivekanandan u. a. (1999), die die Verwendung von polarimetrischen Radartechniken untersuchen, finden ihre Verwendung bei Implementierung des Systems.

Vereisungsvorhersagen sind ein Bestandteil des Portfolios von WHITE. Allerdings steht das Inflight-Icing von Flugzeugen nicht im Mittelpunkt des Systems. Vielmehr sollen die Probleme an Flughäfen, in Form von Niederschlag und Vereisung am Boden, eingeschätzt werden. Deswegen sind an dieser Stelle neben den Veröffentlichungen über Vereisung und SLD auch Arbeiten über die Klassifikation von Niederschlägen und über Schneefallsituationen zu erwähnen. Auch Publikationen, welche die Kombination und das Nowcasting unterschiedlicher Datenquellen, die Anwendung der Fuzzy-Logik in der Meteorologie oder die Entwicklung von Winterwettersystemen im Allgemeinen thematisieren, hatten einen inspirierenden Einfluss auf die Entwicklung von WHITE.

In Rasmussen u. a. (2001) ist zum Beispiel das Winterwetter-Nowcasting-System WSDDM (Weather Support to Deicing Decision Making) beschrieben. Dort werden Messungen der Schneefallrate mit aus der Radarreflektivität abgeleiteten Verschiebungsvektoren verknüpft, um eine halbstündige Vorhersage der Niederschlagsmenge abzuschätzen. Genau beschrieben ist die Vorgehensweise in Rasmussen u. a. (2003). Die Ergebnisse der Vorhersage werden dann zusammen mit anderen meteorologischen Messwerten in einer grafischen Anwendung dargestellt. Die Idee, die Schneefallrate über die Radarmessung zu erhalten, wurde zum Beispiel bereits von Imai u. a. (1955), Smith (1984), Boucher & Wieler (1985), Fujiyoshi u. a. (1990) und Saltikoff u. a. (2000) diskutiert. Saltikoff (2012) fasst die Probleme, die bei diesem Verfahren existieren recht anschaulich zusammen. So besteht immer eine gewisse Unsicherheit über den Niederschlagstyp am Boden, wenn die vertikale Struktur der Atmosphäre nicht bekannt ist. Eine weitere Problematik

ergibt sich aus der Geometrie der Radarmessung. Diese findet in der Regel mit einem bestimmten Elevationswinkel statt, um Bodenechos möglichst zu vermeiden. Allerdings liefert die Messung so in einiger Entfernung vom Radar bereits Reflektivitäten aus höheren Luftschichten. Herrschen in den tieferen Höhen zum Beispiel starke horizontale Winde, können die langsam fallenden Schneeflocken um mehrere Kilometer vom Radarmessort entfernt den Boden erreichen (Lauri u. a., 2012). Auch unterscheidet sich die Reflektivität von Schnee im Vergleich zu flüssigem Niederschlag. Die Dielektrizitätskonstante von Eis ist geringer als die von Wasser. Das führt dazu, dass die Reflektivität ungefähr 7 dB kleiner ist, wenn der Radarstrahl auf Schnee anstatt auf flüssigen Niederschlag trifft. Außerdem sind Schneeflocken in der Regel deutlich größer und haben eine geringere Dichte als Tropfen mit dem gleichen Wassergehalt. Auch diese Tatsache kann zu unterschiedlichen Reflektivitätswerten führen (Rinehart, 2004). Um den Niederschlagstyp zu bestimmen gibt es zudem Ansätze mit polarimetrischen Radargeräten (z.B. Höller u. a. 1994, Liu & Chandrasekar 2000 oder Brandes & Ikeda 2004) oder die Verbindung mit anderen Messgeräten wie optischen Distrometern (z.B. Huang u. a. 2010). Auch die Fernerkundung von Winterwetterbedingungen inklusive unterkühltem Flüssigwassergehalt und Schneefallrate aus dem All mithilfe von Satellitendaten wird in der Literatur ausführlich behandelt. Beispiele hierfür sind die Arbeiten von Gesell (1989), Kriebel (1989), Adams & Vivekanandan (1993), Johnston (1995), Stephens & Kummerov (2007), Levizzani u. a. (2011) und Wang u. a. (2013).

Für eine Klassifikation des Niederschlagstyps ist die Kenntnis über die vertikale Struktur der Atmosphäre elementar. Wichtig ist vor allen Dingen der Temperatur- und Feuchteverlauf mit der Höhe. Publikationen von Stewart (1985, 1992), Zerr (1997), Cortinas u. a. (2004), Theriault u. a. (2006, 2010), Frick & Wernli (2012) und Schuur u. a. (2012) diskutieren und simulieren die theoretische Entstehung unterschiedlicher Niederschlagstypen und vergleichen sie teilweise mit realen Winterwettersituationen. Die Informationen über die vertikale Struktur in den Fallbeispielen werden dabei aus numerischen Wettermodellen gewonnen.

Das Kernelement des WHITE-Systems ist die Untersuchung mehrerer Winterwetterszenarien anhand eigens entwickelter Fuzzy-Sets. In der Literatur findet sich auch zu diesem Thema umfassendes Material. Es gibt zahlreiche meteorologische Anwendungen, die auf der sogenannten unscharfen Logik basieren und eine Analyse und Prognose unterschiedlichster Wetterphänomene berechnen. Die grundlegende Vorgehensweise dabei wird beispielsweise in Murtha (1995) erläutert. Darin wird die Anwendung von Fuzzy-Logik in der Meteorologie am Beispiel der Prognose von strahlungsbedingtem Nebel erklärt. Auch Hansen (1996, 1997) präsentiert jeweils einen empfehlenswerten Überblick über die Möglichkeiten und Methoden der Fuzzy-Logik in der Meteorologie. Anwendungsbezogene Beispiele sind die Arbeiten von Hadjimichael u. a. (2002), Mueller u. a. (2003), Berenguer u. a. (2006), Gencer u. a. (2010), Hansen (2007), Özger u. a. (2012) und Kuk u. a. (2012). Hadjimi-

chael u. a. (2002) versuchen die Sachkenntnisse eines in der lokalen Wettervorhersage erfahrenen Meteorologen mithilfe von Fuzzy-Logik in ein Vorhersagemodell der großskaligen Winde im Mittelmeerraum umzusetzen. In Mueller u. a. (2003) werden verschiedene Datenquellen mit Fuzzy-Logik verknüpft, um ein automatisiertes Nowcasting der Position eines Sturmes zu erlauben. Berenguer u. a. (2006) identifizieren mit Hilfe einer auf Fuzzy-Logik basierenden Technik Falschechos in Radardaten. Hansen (2007) beschreibt einen Vorhersageansatz für Wolkenobergrenze und Sichtverhältnisse, für den Beobachtungsdaten von 190 kanadischen Flughäfen unter Berücksichtigung von Fuzzy-Logik verwendet wurden. Die Publikation von Gencer u. a. (2010) behandelt die Anwendung von Fuzzy-Logik in der Inflight-Vereisungsvorhersage, die Arbeit von Özger u. a. (2012) die Optionen bei der Vorhersage von Dürreperioden. Kuk u. a. (2012) zeigen die Möglichkeit aus Daten von Radiosondenaufstiegen mithilfe von Fuzzy-Logik Blitzvorhersagen zu entwickeln.

Neben einer sinnvollen und operationell einsetzbaren Kombination mehrerer Datenquellen durch Fuzzy-Logik, steht die kurzfristige Vorhersage verschiedener Parameter im Fokus der vorliegenden Arbeit. Hier gehen vor allem Konzepte ein, die sich aus den Ergebnissen des DLR Projektes Wetter & Fliegen (vgl. Kapitel IV.1) ergeben. Inspirierenden Einfluss zu diesen Thematiken hatten auch die Arbeiten über das INCA-System (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis; Haiden u. a. 2011), über das VERA-System (Vienna Enhanced Resolution Analysis; u.a. Steinacker u. a. 1997, 2000, 2006) und über die ABOM-Methode (Adaptive Blending of Observations and Model; Bailey u. a. 2012; Isaac u. a. 2012). Der Ansatz des INCA-Systems ist, Vorhersagefelder eines numerischen Wettermodells anhand verfügbarer Beobachtungen zu korrigieren und die räumliche Auflösung zu verfeinern. Dabei wird insbesondere auf die komplexe alpine Orographie und Topographie eingegangen. Ganz anders als INCA beruht das VERA-System nur auf Beobachtungsdaten. Auch dort wird eine flächendeckende Analyse und Prognose mit möglichst hoher temporaler und räumlicher Auflösung erstellt. Der Ansatz hier ist es, unregelmäßig verteilte Beobachtungsdaten von Fehlern zu befreien und mittels einer Fingerprint-Methode unter Berücksichtigung der Orographie, eine Analyse verschiedener Bodenfelder auf einem regelmäßigem Gitter zu erstellen. Die ABOM-Methode kombiniert zeitlich extrapolierte Beobachtungstrends mit Modellvorhersagen und generiert so kurzfristige Prognosen für unterschiedliche Parameter. Unter anderem das AVISA-System (Airport Vicinity Icing and Snow Advisor; Isaac u. a. 2006) und die Arbeiten von Glahn & Lowry (1972), Wilson & Vallee (2002) und Ghirardelli & Glahn (2010) stellen dabei die wissenschaftliche Grundlage für die Entwicklung der ABOM-Methode dar, die im Kapitel IV.3.2.1 ausführlicher erläutert wird.

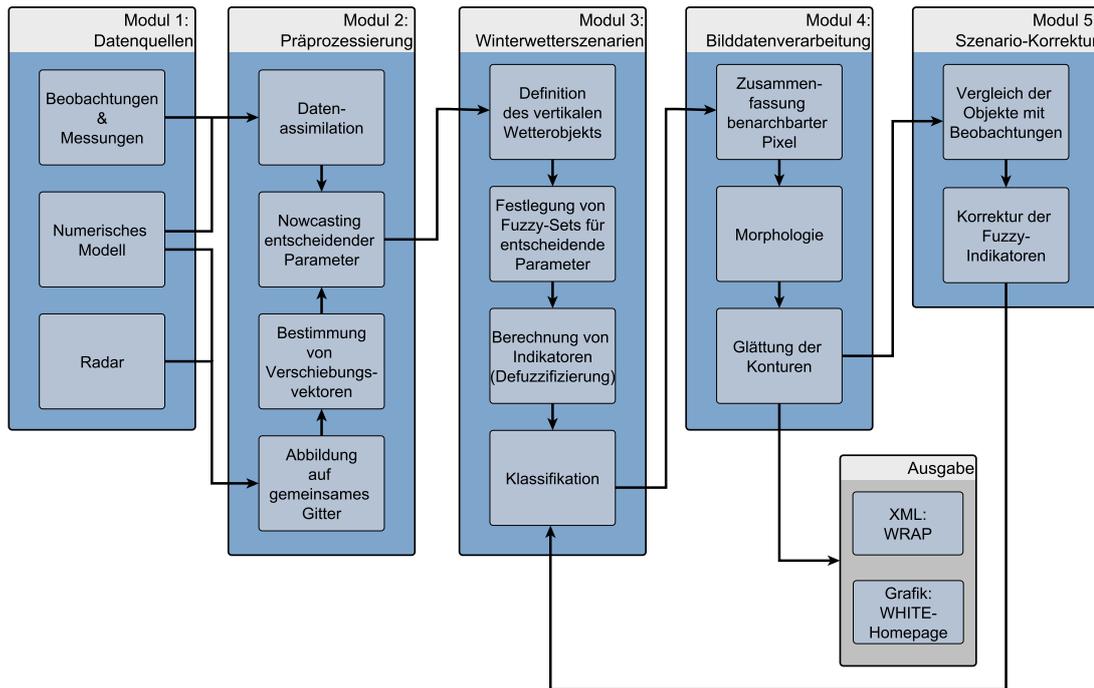


Abbildung IV.2.: Schematisches Konzept des WHITE-Nowcasting-Systems

IV.3. Das Nowcasting-System von WHITE

Abbildung IV.2 zeigt schematisch das Konzept des WHITE-Nowcasting-Systems, das im Laufe dieses Kapitels besprochen wird. Es ist modular aufgebaut. Jedes Modul birgt unabhängig von den anderen weiteres Entwicklungspotential und könnte jeweils einzeln bearbeitet werden. Die einzelnen Module der aktuellen quasioptionell getesteten Version sind in den Kapiteln IV.3.1 bis IV.3.5 beschrieben.

IV.3.1. Modul 1: Datenquellen

In diesem Kapitel werden die in WHITE verarbeiteten Datenquellen beschrieben. Zusätzliche Daten, die zum Beispiel für die Verifikation der WHITE-Analysen und Prognosen verwendet werden und Datenquellen, die aus unterschiedlichen Gründen in der aktuellen operationellen Version von WHITE nicht verarbeitet werden, aber in zukünftigen Forschungen möglicherweise Verbesserungen in Aussicht stellen, werden in den Kapiteln IV.1 bzw. V angesprochen. Für die Beurteilung von Winterwetter am Flughafen reicht es nicht aus, lediglich die bodennahen Verhältnisse zu betrachten. Es muss immer auch die Atmosphäre darüber betrachtet werden, denn in der unteren Troposphäre und vor allem 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 mit einzubeziehen. 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 die korrekte kurzfristige Vorhersage und die Koordinierung der Winterwetteroperationen am Flughafen sind letztendlich von der Aktualität der Situationsanalyse abhängig (Keis & Tafferner, 2014). Aus diesen Gründen wird für die operationell arbeitende Version von WHITE auf die Prognosen des numerischen Wettervorhersagemodells COSMO-DE, die regelmäßigen Beobachtungen der SYNOP und SWIS Stationen sowie auf die Messungen des deutschlandweiten Radarkomposit RX zurückgegriffen.

IV.3.1.1. Beobachtungs- und Messstationen im Untersuchungsgebiet

Im Blickpunkt der vorliegenden Arbeit liegt ein Untersuchungsgebiet um die TMA (Terminal Manoeuvring Area) des Flughafen Münchens (vgl. Kapitel IV.5.1). 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 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. Abbildung IV.3 zeigt einen Überblick über das Untersuchungsgebiet. In die Karte sind zudem die Positionen aller verfügbaren Beobachtungsstationen mit regelmäßigen Temperatur- und Feuchtemessungen oder Wetterbeobachtungen gekennzeichnet. Insgesamt sind im Untersuchungsgebiet etwa 280 davon vorhanden. Etwa 150 dieser Stationen sind Bestandteil des haupt- oder nebenamtlichen Beobachtungsnetzwerks des Deutschen Wetterdienstes. An den Wetterwarten und Flugwetterwarten des DWD werden kontinuierlich zahlreiche Parameter durch die Automatische Meteorologische Datenerfassungsanlage (AMDA) gemessen und das aktuelle Wetter jeweils zur vollen Stunde von erfahrenen Beobachtern bestimmt. Die Temperatur- und Feuchtemessung erfolgt dabei mit einem PT-100-Widerstandsthermometer bzw. einem Vaisala HMP-45D-Feuchtesensor (Keis, 2010). Neben diesen standardisierten Messungen werden an den Flugwetterwarten zusätzliche Beobachtungen durchgeführt und beispielsweise als METAR (Meteorological Aviation Routine Weather Report) veröffentlicht. An den unbemannten Wetterstationen ist zur Messung meteorologischer Parameter ebenfalls das AMDA-System im Einsatz. Im Unterschied zu den bemannten Wetterwarten wird an den vollautomatisierten Wetterstationen die Bestimmung des aktuellen Wetters durch einen Present-Weather-Sensor vom Typ Laser-Niederschlagsmonitor durchgeführt. Neben den hauptamtlichen Beobachtungsstationen existieren zusätzlich ehrenamt-

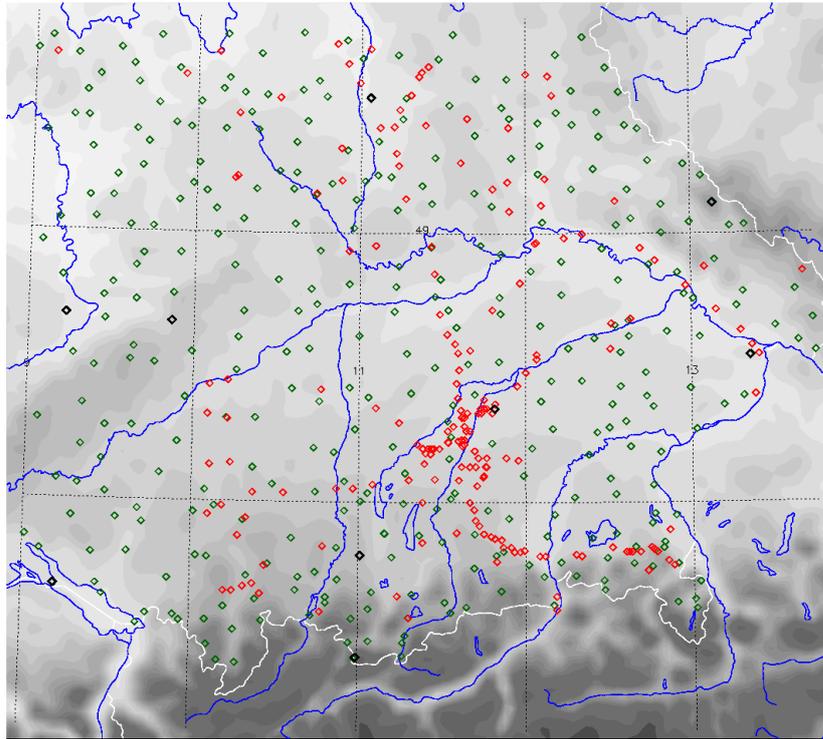


Abbildung IV.3.: *Untersuchungsgebiet von WHITE mit den verfügbaren Beobachtungsstationen. Wetterwarten sind durch blaue, haupt- und nebenamtliche Wetterstationen durch grüne und SWIS-Stationen durch rote Symbole gekennzeichnet.*

lich betreute Wetterstationen, an denen teilweise ebenfalls automatisiert Messungen durchgeführt werden. Durch die Automatisierung ist eine kontinuierliche Beobachtung möglich. Die Daten der Wetterwarten werden alle 30 Minuten, die der haupt- und nebenamtlichen Wetterstationen alle 60 Minuten in die Datenbanken des DWDs aufgenommen (DWD, 2014). Für die Forschungsarbeit an WHITE stehen diese Daten zur Verfügung, so dass jeweils zur vollen und zur halben Stunde Temperatur- und Feuchtemessungen sowie Wetterbeobachtungen des Beobachtungsnetzes des DWD verarbeitet werden können. Zusätzlich zu diesen Daten sind die automatisierten Messstationen des Straßen-Wetter-Informationssystems (SWIS) verfügbar. Das SWIS wird ebenfalls betrieben vom DWD. Es beinhaltet zahlreiche Stationen entlang der Autobahnen und wichtigen Landstraßen. An allen Messstationen werden unter anderem die Temperatur, die Bodentemperatur und an den neueren Stationen auch die Feuchte mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten gemessen. Durch Hinzunahme dieses Datensatzes kann WHITE auch an den Zwischenzeitpunkten 15 Minuten vor und nach jeder vollen Stunde auf Beobachtungen zurückgreifen.

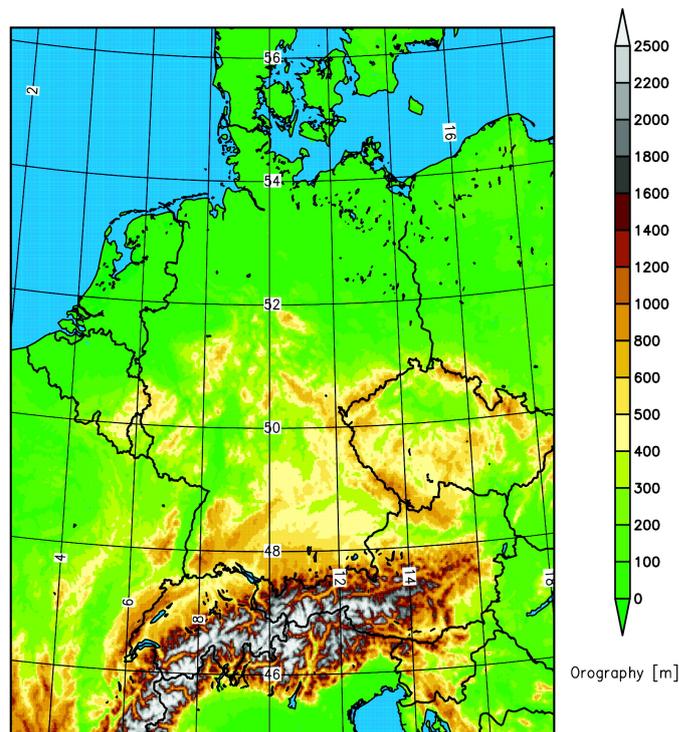


Abbildung IV.4.: Abdeckungsgebiet von COSMO-DE. Abbildung aus Baldauf u. a. (2011).

IV.3.1.2. COSMO-DE

Seit April 2007 wird vom Deutschen Wetterdienst das numerische Wettervorhersagemodell COSMO-DE operationell betrieben. Das Consortium for Small Scale Modelling (COSMO) ist eine Interessengemeinschaft, die sich aus den nationalen Wetterdiensten der Länder Deutschland, Griechenland, Russland, Polen, Italien, Rumänien und der Schweiz zusammensetzt. Der Hintergrund der Zusammenarbeit ist die Absicht, die wissenschaftlichen Ressourcen zu bündeln und Fortschritte im Forschungsbereich *regionale numerische Wettervorhersage* zu erzielen. COSMO-DE arbeitet mit einer horizontalen Auflösung von 2.8 km und besitzt eine vertikale Gitterstruktur von 50 Hauptflächen (Schichtmitten) und 51 Nebenflächen (Schichtgrenzen), die eine Höhe von 22 km abdecken. Das verwendete Koordinatensystem ist hybrid. Im oberen Bereich sind die Modellflächen horizontal, während sie sich in den tieferen Schichten der Modellorographie anpassen (Baldauf u. a., 2009). Das WHITE-System benutzt die untersten 30 Hauptflächen von COSMO-DE, was eine vertikale Abdeckung von ca. 7.5 km bis 8 km bedeutet, und die für 2 m über dem Erdboden interpolierten Informationen. Abbildung IV.4 zeigt die horizontale Domäne von COSMO-DE. Neben dem deutschen Staatsgebiet sind auch Teile der angrenzenden Staaten Frankreich, Belgien, Holland, Luxemburg, Dänemark, Polen, Tschechien, Slowakei, Österreich, Ungarn, Slowenien, Kroatien, Italien, Schweiz

und Liechtenstein durch die ca. 9.7 Millionen Gitterpunkte abgedeckt. COSMO-DE ist eine Weiterentwicklung des gröber aufgelösten europaweiten Modells COSMO-EU. Die Randbedingungen für den operationellen Betrieb, der zu den Uhrzeiten 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 und 21 UTC jeweils Vorhersagen für die folgenden 18 Stunden produziert, werden aus diesem COSMO-EU Modell entnommen. Durch die verfeinerte räumliche Auflösung kann zum Beispiel die Konvektion im COSMO-DE Modell direkt simuliert werden und muss nicht wie im COSMO-EU Modell parametrisiert werden. Auch die Parametrisierung der Wolkenmikrophysik ist in COSMO-DE im Vergleich zu COSMO-EU überarbeitet. So ist zum Beispiel ein Ein-Momenten Schema realisiert, um die Entstehung von Wolkenwasser, Regenwasser, Wolkeneis, Schnee und Graupel abzuschätzen (Baldauf u. a., 2011). Neben den Vorhersagen werden mithilfe kontinuierlicher Datenassimilation auch für jede volle Stunde Analysefelder berechnet. Allerdings dauert der Assimilationszyklus bis zu dreieinhalb Stunden und ist deshalb für ein Nowcasting nicht verwendbar. Die Publikation von Dierer u. a. (2009) zeigt, dass das COSMO Modell im Mittel zu einer Überschätzung von winterlichem Niederschlag neigt. Auch die Assimilation von Radardaten durch das so genannte Latent-Heat-Nudging-Verfahren hat nur auf die Analysen positive Auswirkungen. Für die Vorhersagen nimmt dieser positive Einfluss mit zunehmender Vorhersagezeit rapide ab (Stephan & Schraff, 2008). In WHITE werden aus diesen Gründen nur möglichst aktuelle Vorhersagen des jüngsten Hauptlaufes verwendet. Der genaue operationelle Ablauf von WHITE wird in Kapitel IV.5 gezeigt.

IV.3.1.3. Radar-Komposit RX

Neben Beobachtungs- und Modelldaten werden in der operationellen Version von WHITE Daten des deutschlandweiten Radar-Komposits RX verarbeitet. Unterhalten und betrieben wird das Netzwerk an Radar-Messgeräten vom Deutschen Wetterdienst. Aufgabe des Netzwerkes ist die Durchführung einer flächendeckenden Niederschlagsmessung. Zu diesem Zweck werden unterschiedliche Produkte bereitgestellt. Für das Nowcasting ist das wichtigste Produkt der so genannte Precipitation-Scan. Dabei wird mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten und einer räumlichen Auflösung von 1 km eine Radarmessung mit einem möglichst geringen Elevationswinkel durchgeführt. Der Elevationswinkel ist abhängig von der Orographie und beträgt zwischen $0,5^\circ$ und $1,8^\circ$. Der Precipitation-Scan ist die bestmögliche flächendeckende Annäherung an die tatsächliche Niederschlagsituation. Durch den flachen Elevationswinkel können auch die vor allem im Winter teilweise niedrigen Wolken mit Niederschlag erfasst werden. Die Einzelmessungen der lokalen Radargeräte werden von einem Großrechner des DWD überlagert und zu einem deutschlandweiten Komposit kombiniert. Der Vorteil dieses Produkts für das Nowcasting ist zum einen die sehr hohe zeitliche Auflösung und zum anderen die schnelle Verfügbarkeit der Daten. Dadurch können, wie in Kapitel

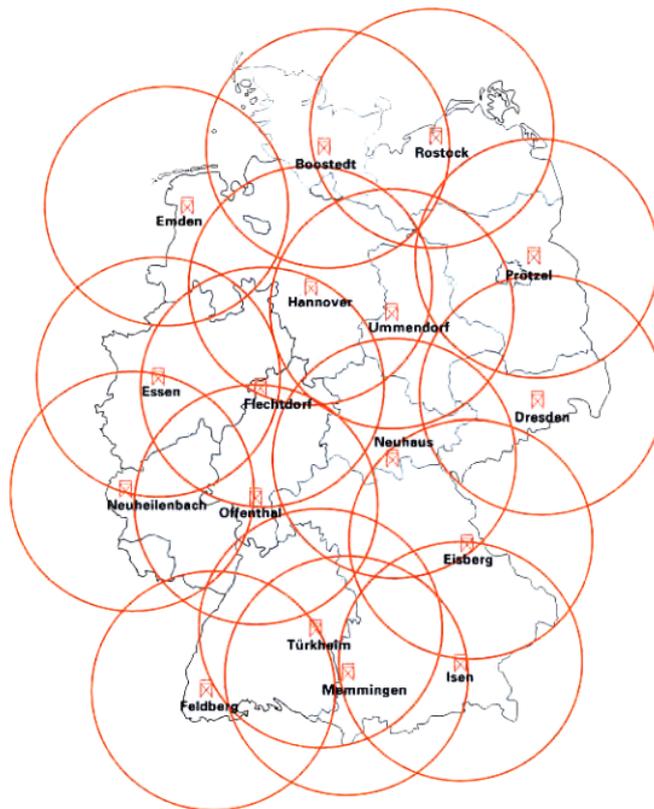


Abbildung IV.5.: Standorte der Messgeräte des deutschen Radarnetzwerks. Abbildung aus Friedrich u. a. (2013)

IV.3.2.2 noch gezeigt wird, Verschiebungsvektoren der Radarreflektivitäten berechnet und Zugrichtung und -geschwindigkeit von Niederschlagsfeldern abgeleitet werden. Abbildung IV.5 zeigt die Standorte der 17 operationellen Radargeräte des Deutschen Wetterdienstes. Die Reichweite der Radargeräte beträgt jeweils 150 km. So kann eine lückenlose Abdeckung des gesamten Bundesgebietes gewährleistet werden.

IV.3.2. Modul 2: Präprozessierung und Nowcasting der Daten

Die übliche Vorgehensweise für die sehr kurzfristigen Vorhersagen des Nowcastings ist die möglichst akkurate Einschätzung der aktuellen Situation und die Ableitung zukünftiger Situationen von diesem momentanen Zustand (Golding, 1998). Im Normalfall reichen dabei die Informationen eines oder weniger Punkte nicht aus, um selbst eine so kurzfristige Vorhersage von Winterwetter (oder Wetter im Allgemeinen) zu ermöglichen. Aus Messungen und Beobachtungen allein lassen sich nur schwer Prognosen ableiten, da zum Beispiel so keine Informationen über advective

Prozesse oder mikrophysikalische Vorgänge in höheren Atmosphärenschichten gewonnen werden können. In der Literatur existieren einige Ansätze aus den lokalen Messungen der Beobachtungsstationen flächendeckende Informationen zu gewinnen. Oft wird dabei eine Kombination mit Modellvorhersagen realisiert (vgl. Kapitel IV.2). Vor der Anwendung des Kernelements des WHITE-Systems, den Fuzzy-Logik-Algorithmen, werden die eingehenden Daten (vgl. Kapitel IV.3.1.1) einer Präprozessierung unterzogen. Ziel dieses Moduls ist es, für jeden Zeitschritt und für jeden Vorhersagezeitpunkt ein Feld aller benötigten Parameter zu erhalten. In den WHITE-Algorithmen werden die Parameter Lufttemperatur und relative Feuchte in dreidimensionaler Form sowie die Bodentemperatur und die Radarreflektivität des Precipitation-Scans als zweidimensionales Feld verarbeitet. Um flächendeckende Daten sowie Informationen über höhere Luftschichten zu erhalten, werden die Modellvorhersagen des COSMO-DE Modells als First-Guess Information verwendet. Dieses First-Guess-Feld wird durch die Datenassimilationstechnik von Cressman (1959) anhand aktueller Beobachtungen korrigiert und nach dem Vorbild von Bailey u. a. (2012) mithilfe der ABOM-Methode für die Nowcasting-Schritte extrapoliert. Das Reflektivitätsfeld des Radar-Komposits RX wird zunächst auf das COSMO-DE Gitter abgebildet und für die Vorhersagezeitpunkte mithilfe des am DLR für den Vergleich von Satellitendaten entwickelten Pyramidal-Image-Matching-Verfahren (Mannstein u. a., 1999) extrapoliert.

IV.3.2.1. Modellprognosen und Beobachtungsdaten

Die Vorhersagen von Lufttemperatur, relativer Feuchte und Bodentemperatur werden für den aktuellen Zeitschritt aus dem jeweils jüngsten verfügbaren COSMO-DE Modellauf entnommen. Der genaue zeitliche Ablauf während der operationellen Testphase von WHITE ist dem Kapitel IV.5 zu entnehmen. Lufttemperatur und Bodentemperatur werden vom Modell direkt ausgegeben, während die relative Feuchte bzw. die Taupunkttemperatur unter Hinzunahme des Luftdrucks aus der spezifischen Feuchte berechnet wird. Wie schon in Kapitel IV.3.1.2 erwähnt, werden in WHITE die untersten 30 Hauptflächen zusammen mit der bodennahen 2-m-Schicht des COSMO-DE Modells als grundlegendes Rechengitter für die dreidimensionalen Informationen verwendet. Das zweidimensionale Feld der Bodentemperatur wird als ergänzende Information separat behandelt.

Korrektur der Modellvorhersagen für den Analysezeitpunkt COSMO-DE produziert achtmal täglich Vorhersagen für jeweils 18 Stunden. Für die vollen Stunden sind also direkt Modellvorhersagen verfügbar. Da WHITE aber eine möglichst hohe zeitliche Auflösung anstrebt und in der operationellen Testphase im 15-minütigen Rhythmus rechnet, müssen für die Zwischenschritte die Modellvorhersagen aller Parameter interpoliert werden. Im WHITE-Algorithmus ist diese

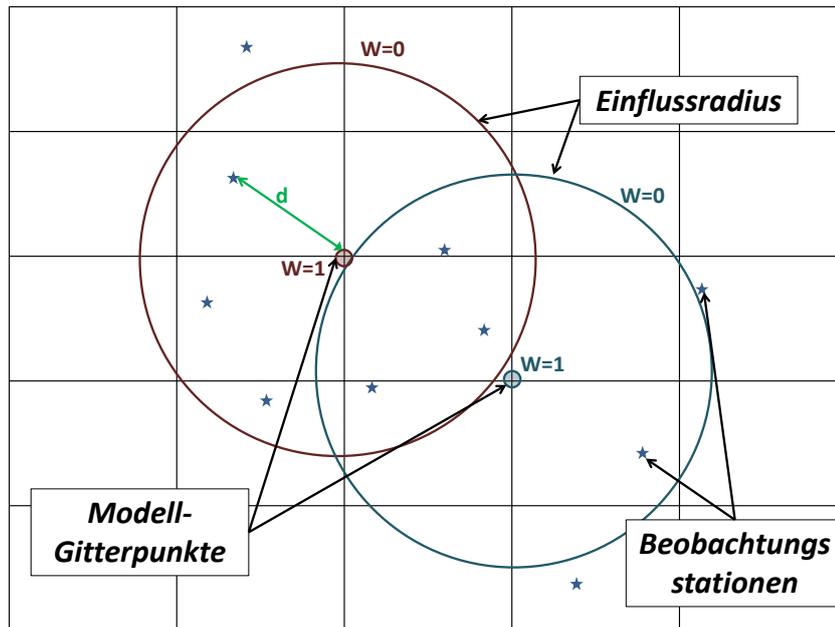


Abbildung IV.6.: Schematische Darstellung der Cressman-Interpolation. Erläuterung siehe Text.

zeitliche Interpolation für die Analysezeitpunkte realisiert durch das lineare Schema in Gleichung IV.1.

$$\psi_{\tau} = \Psi_{\alpha} + \frac{\tau}{60\text{min}}(\Psi_{\beta} - \Psi_{\alpha}) \quad (\text{IV.1})$$

- mit Ψ_{α} Modellvorhersage für die vorangehende volle Stunde α
 Ψ_{β} Modellvorhersage für die nachfolgende volle Stunde β
 τ Zeitpunkt des Zwischenschrittes in Minuten
 nach der vorangehenden vollen Stunde ($\tau=15,30,45$)
 ψ_{τ} Interpolierte Modellvorhersage zum Zeitpunkt des Zwischenschrittes.

Auch für die jeweiligen Nowcasting-Schritte von WHITE (+15min, +30min, +60min und +120min nach dem Analysezeitpunkt) werden die entsprechenden Modellvorhersagen nach Gleichung IV.1 linear in der Zeit interpoliert bzw. die Vorhersagen für die folgenden Stunden verwendet. Wird WHITE beispielsweise um 1130 UTC gestartet, so wird für den Analysezeitpunkt ψ_{30} aus Ψ_{11} und Ψ_{12} berechnet. Für den Nowcasting-Zeitschritt +15min wird ψ_{45} aus denselben beiden Modellvorhersagen kalkuliert. Der Nowcasting-Schritt +30min wird durch Ψ_{12} abgedeckt, die Vorhersagezeitpunkte +60min und +120min werden dementsprechend durch ψ_{30} aus Ψ_{12} und Ψ_{13} bzw. aus Ψ_{13} und Ψ_{14} berechnet.

Das Cressman-Interpolationsschema (Cressman, 1959) ist eine einfache und seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzte Datenassimilationstechnik, die im Vergleich zu moderneren Verfahren (z.B. Kalman-Filter, 3D-Var, 4D-Var, Optimale Interpolation) ohne großen Rechenaufwand auskommt. Für das zeitlich hochaufgelöste

WHITE-Nowcasting-System ist diese Recheneffizienz ein ausschlaggebender Faktor, zumal die Anwendung aufwändiger Datenassimilation nicht im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit stehen. Abbildung IV.6 zeigt schematisch den iterativen Ansatz des Cressman-Schemas. Für jeden Gitterpunkt des First-Guess Modellfeldes wird für den Analysezeitpunkt ein gewichteter mittlerer Korrekturwert aus den Messungen der umliegenden Beobachtungsstationen berechnet. Stationen, die sich innerhalb eines vorher definierten Einflussradius um den Gitterpunkt befinden, werden bei dieser Kalkulation berücksichtigt. Mit welcher Wichtung sie eingehen, hängt von ihrer Entfernung vom Mittelpunkt des Einflussradius ab. In WHITE werden dabei neben der horizontalen Distanz auch der vertikale Abstand zwischen Gitterpunkt und Beobachtungsstation berücksichtigt, um zum Beispiel in Alpennähe auf Messungen von Bergstationen bei Gitterpunkten im Flachland nicht zu stark Schwerpunkte zu setzen. Um die unterschiedliche Größenskalen der horizontalen und vertikalen Distanzen zu berücksichtigen, wird dabei der horizontale Abstand von 1 km gleich stark gewichtet wie 1 m Höhenunterschied. Gleichung IV.2 zeigt, wie der Wert eines Parameters χ am Gitterpunkt i durch m Iterationen mithilfe der Cressman-Gewichtungsfunktion w berechnet wird (Daley, 1991).

$$\chi_i^{m+1} = \chi_i^m + C_i = \chi_i^m + \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}^m (O_j - \chi_i^m)}{\sum_{j=1}^n w_{ij}^m} \quad (\text{IV.2})$$

mit

$$w_{ij} = \max\left(0, \frac{R^2 - d_{ij}^2}{R^2 + d_{ij}^2}\right)$$

- und O Wert der j -ten Beobachtung um Gitterpunkt i
 d Räumliche Distanz zwischen Gitterpunkt i und Beobachtung j
 R Einflussradius definiert als $R = \sqrt{10[\text{km}]^2 + 10[\text{m}]^2}$

Das Cressman-Verfahren wird für die Parameter Temperatur und Feuchte jeweils durchgeführt auf den auf 2 m extrapolierten Modellflächen. Ebenfalls durchgeführt wird sie für das Modellfeld der Bodentemperatur. Für die restlichen Modellflächen k wird der so ermittelte Korrekturwert C_i in Abhängigkeit von der Druckdifferenz zur bodennahen Modellschicht ($p_{2m} - p_k$) anteilig übernommen. In der untersten Modellfläche ($k = 1$) wird der Korrekturwert ebenfalls noch vollständig angewandt.

$$C_i^k = \frac{C_i}{p_{2m} - p_k} (p_{2m} - p_{k=1})$$

Durch die lineare temporale Interpolation der Modellparameter und durch das modifizierte Datenassimilationsverfahren nach Cressman stehen WHITE für alle Analysezeitpunkte Informationen in dreidimensionaler Form über den Zustand der Atmosphäre in Form von korrigierten Modellprognosen zur Verfügung. Der nächste Arbeitsschritt von WHITE beinhaltet das Nowcasting dieser Felder, um auch für die Vorhersagezeitpunkte analoge Ausgangssituationen zur Anwendung der Fuzzy-Algorithmen zu besitzen.

Nowcasting entscheidender Parameter: Die ABOM-Methode und die Anwendung in WHITE Die ABOM-Methode wird zum Beispiel in den Arbeiten von Bailey u. a. (2012) und Isaac u. a. (2012) vorgestellt. Für Flughäfen in Kanada und für die olympischen Winterspiele in Vancouver 2012 wurde eine Methode entwickelt, um für einzelne Orte durch eine Verbindung von aktuellen Beobachtungen und Modellvorhersagen ein Nowcasting verschiedener entscheidender Parameter zu erhalten. Diese Verbindung wird im Folgenden als Blending bezeichnet. Der theoretische Hintergedanke dabei ist, dass abhängig vom Vorhersagezeitraum Informationen aus Beobachtungen und Informationen aus Modellen unterschiedlich gut geeignet sind, um atmosphärische Entwicklungen vorrauszusagen. Für sehr kurze Zeiträume ist eine Vorhersage aus der Persistenz oder dem Trend von Beobachtungen besser geeignet, während für längere Zeiträume das Modell bessere Ergebnisse erzielen wird. Die charakteristische Zeitspanne, nach der die Modellvorhersage die bessere Methode ist, ist aber keine Konstante. Sie variiert in Abhängigkeit von Tageszeit, Jahreszeit oder der jeweiligen Wetterlage. Eine effektive Blending-Methode sollte deshalb keine starren Wichtungsfunktionen verwenden, sondern diese Variabilität berücksichtigen können. Die ABOM-Methode berechnet die Leistungsfähigkeit der Vorhersagen der vorangehenden Zeitschritte und zieht dabei sowohl den Trend und die Persistenz von Beobachtungen als auch die Modellvorhersagen in Betracht. Die Vorhersagen des aktuellen Zeitschritts passen sich also jeweils an die momentane Situation an und berücksichtigen dabei die Vorhersagequalität unterschiedlicher Ansätze. In WHITE wird diese anpassungsfähige Blending-Methode flächendeckend für alle Gitterpunkte umgesetzt. Gleichung IV.3 zeigt den grundlegenden Ansatz der ABOM-Methode.

$$V = O_O + q\Delta O_P + s\Delta O_T + r\Delta M \quad (\text{IV.3})$$

mit

$$q + s + r = 1$$

und	V	<i>Nowcasting-Wert eines Parameters</i>
	O_O	<i>Aktuelle Messung des Parameters</i>
	ΔO_P	<i>Vorhergesagte Änderung des Parameters durch Beobachtungspersistenz</i>
	ΔO_T	<i>Vorhergesagte Änderung des Parameters durch die Extrapolation des aktuellen Trends</i>
	ΔM	<i>Vorhergesagte Änderung des Parameters durch das NWP-Modell</i>
	q, s, r	<i>Wichtungsfaktoren</i>

Der Persistenzterm in der Wichtungs-Gleichung IV.3 ist per Definition gleich null. Allerdings bleibt er formal Teil der Gleichung, da sein Wichtungsfaktor q von null verschieden ist und je nach Persistenz des Parameters die Gewichtung der anderen beiden Methoden beeinflusst.

In der quasioperationellen Version von WHITE werden die Wichtungsfaktoren durch die Qualität der Vorhersagen der vorangegangenen Zeitschritte bestimmt. Dabei werden sowohl der mittlere absolute Fehler als auch die Fehlervarianz jeder

Methodik berücksichtigt. Die Methoden, die dabei zum Einsatz kommen sind die Persistenzvorhersage, die lineare Extrapolation des Trends und die Modellvorhersage. Für die Extrapolation des Trends wird dabei die Entwicklung des mit Beobachtungen korrigierten First-Guess-Modellfeldes (vgl. Kapitel IV.3.2.1) im Vergleich zu früheren Analysezeitschritten betrachtet. Gleichung IV.4 zeigt wie diese Entwicklung in eine lineare Extrapolation umgesetzt wird.

$$\chi(t_{nwc}) = \chi(0) + \frac{2(\chi(0) - \chi(t_{-15min})) + (\chi(0) - \chi(t_{-30min}))}{4} \frac{t_{nwc}}{15min} \quad (IV.4)$$

mit

$$t_{nwc} = [15min, 30min, 60min, 120min]$$

Als erster Schritt des angepassten Blendings wird für alle Beobachtungsstationen, die zum jeweiligen Zeitpunkt Messungen durchführen, der Gitterpunkt ermittelt, der am nächsten an der Beobachtungsstation liegt. Dafür wird mit Gleichung IV.5 für jede Beobachtungsstation die minimale Summe δ der quadratischen Differenzen zwischen den geografischen Koordinaten der Gitterpunkte ij der untersten Modellschicht und der Beobachtungsstation berechnet.

$$\delta = \min[(lat_{ij} - lat_{obs})^2 + (lon_{ij} - lon_{obs})^2] \quad (IV.5)$$

Anschließend wird für alle Methoden die Differenz zwischen aktueller Beobachtung χ^{obs} und Vorhersage der vorrangegangenen Zeitschritte für den entsprechenden Gitterpunkt χ^{gp} bestimmt. Gleichung IV.6 verdeutlicht die Vorgehensweise.

$$\Delta\chi(-t_{nwc}) = \chi^{obs} - \chi^{gp}(-t_{nwc}) \quad (IV.6)$$

mit

$$t_{nwc} = [15 min, 30 min, 60 min, 120 min]$$

Für jedes t_{nwc} , also für jede vorausgehende betrachtete Vorhersage n , wird anschließend der mittlere absolute Fehler MAE sowie die Varianz σ^2 berechnet. Aus diesen beiden Größen lassen sich die normierten Wichtungsfaktoren für das Blending jedes Parameters entsprechend den Gleichungen IV.7 berechnen.

$$\begin{aligned} q &= \frac{1}{\sigma_q^2 N_{\sigma^2}} + \frac{1}{MAE_q N_{MAE}} \\ s &= \frac{1}{\sigma_s^2 N_{\sigma^2}} + \frac{1}{MAE_s N_{MAE}} \\ r &= \frac{1}{\sigma_r^2 N_{\sigma^2}} + \frac{1}{MAE_r N_{MAE}} \end{aligned} \quad (IV.7)$$

Dabei sind

$$N_{\sigma^2} = \frac{1}{\sigma_q^2} + \frac{1}{\sigma_s^2} + \frac{1}{\sigma_r^2}$$

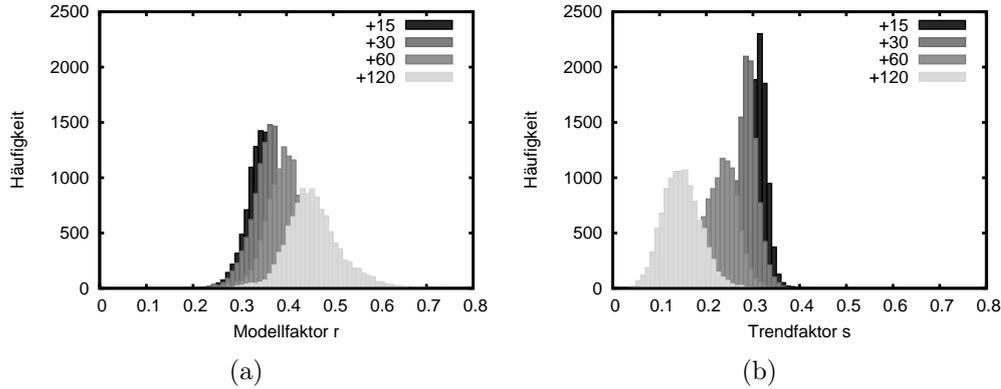


Abbildung IV.7.: ABOM-Methode: Häufigkeitsverteilungen des Modellfaktors (a) und des Trendfaktors (b)

und

$$N_{MAE} = \frac{1}{MAE_q} + \frac{1}{MAE_s} + \frac{1}{MAE_r}$$

die Normierungsterme und für jede Methode gilt:

$$MAE = \frac{\sum_n |\Delta\chi(-t_{nwc})|}{n}$$

und

$$\sigma^2 = \frac{\sum_n (|\Delta\chi(-t_{nwc})| - MAE)^2}{n}.$$

Die so berechneten Wichtungsfaktoren werden in Gleichung IV.3 eingesetzt. Für jeden Punkt im dreidimensionalen Gitter gelten also dieselben Wichtungen. Abbildung IV.7 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Wichtungsfaktoren in Abhängigkeit vom Vorhersagezeitrahmen für die Lufttemperatur. Man erkennt, dass mit zunehmender Vorhersagezeit der Faktor r anwächst, während sich der Faktor s reduziert. Der Einfluss der Modellvorhersage nimmt zu, der Einfluss der Trendvorhersage nimmt mit zunehmender Vorhersagezeit ab.

Für die Variablen Taupunkttemperatur und Bodentemperatur ergeben sich Häufigkeitsverteilungen, die Abbildung IV.7 ähneln und an dieser Stelle nicht zusätzlich gezeigt sind. Durch die Anwendung der ABOM-Methode kann für jeden Nowcasting-Schritt und für jede Variable ein Vorhersagefeld berechnet werden. Ein Vergleich dieser Vorhersagefelder mit Messungen in Bodennähe zeigt, dass die Qualität der Vorhersage im Vergleich zur reinen Modellvorhersage oder zur reinen Trendvorhersage durch das Blending für alle Nowcasting-Schritte gesteigert werden kann. In Abbildung IV.8 ist der mittlere absolute Fehler (MAE: mean absolute error) der unterschiedlichen Vorhersagemethoden für die drei Variablenfelder Lufttemperatur, Bodentemperatur und Taupunkttemperatur gezeigt. Auch hier ist gut

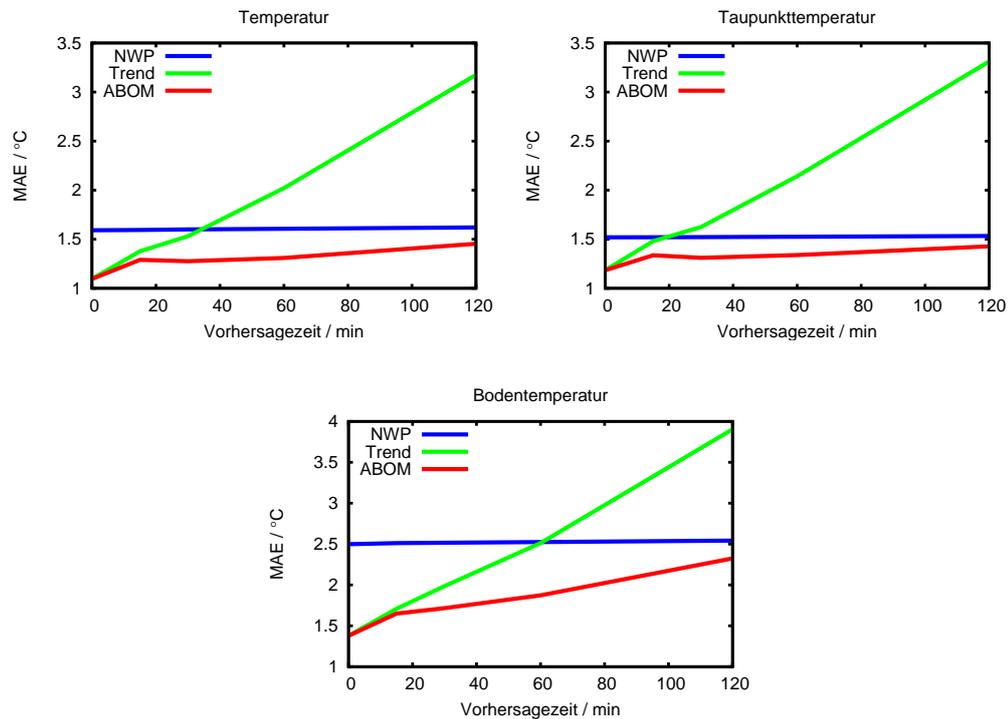


Abbildung IV.8.: MAE (mean absolute error) unterschiedlicher Vorhersagemethoden. Für die drei Variablenfelder Temperatur, Taupunkttemperatur und Bodentemperatur werden die bodennahen Nowcasting-Felder mit den Beobachtungen verglichen. Die Fehler sind über den Zeitraum der Winterkampagne 2013/2014 und über das Untersuchungsgebiet gemittelt. Die ABOM-Methode steigert die Qualität der Vorhersage. Für kurze Vorhersagezeiten dominiert die Trendvorhersage, für lange Vorhersagezeiten tendiert die ABOM-Methode gegen die Modellvorhersage (NWP: Numerical weather prediction).

zu erkennen, dass für kurze Vorhersagezeiträume der Einfluss der Trendvorhersage dominiert, während für die längerfristigen Prognosen die Bedeutung der Modellvorhersagen überwiegt. Der mittlere Fehler der ABOM-Methode liegt für alle drei untersuchten Variablen und für alle Vorhersagezeiten immer unterhalb der mittleren Fehler der Trendvorhersage und der Modellvorhersage.

IV.3.2.2. Radardaten

Neben den Temperatur- und Feuchtefeldern werden in der aktuellen quasioperationalen Version von WHITE noch Daten des Precipitation-Scans des deutschen Radarnetzwerks verarbeitet. Diese Daten besitzen eine zeitliche Auflösung von fünf Minuten und eine räumliche Auflösung von einem Kilometer. Um Konformität mit den anderen eingehenden Daten zu erhalten, werden die Radardaten

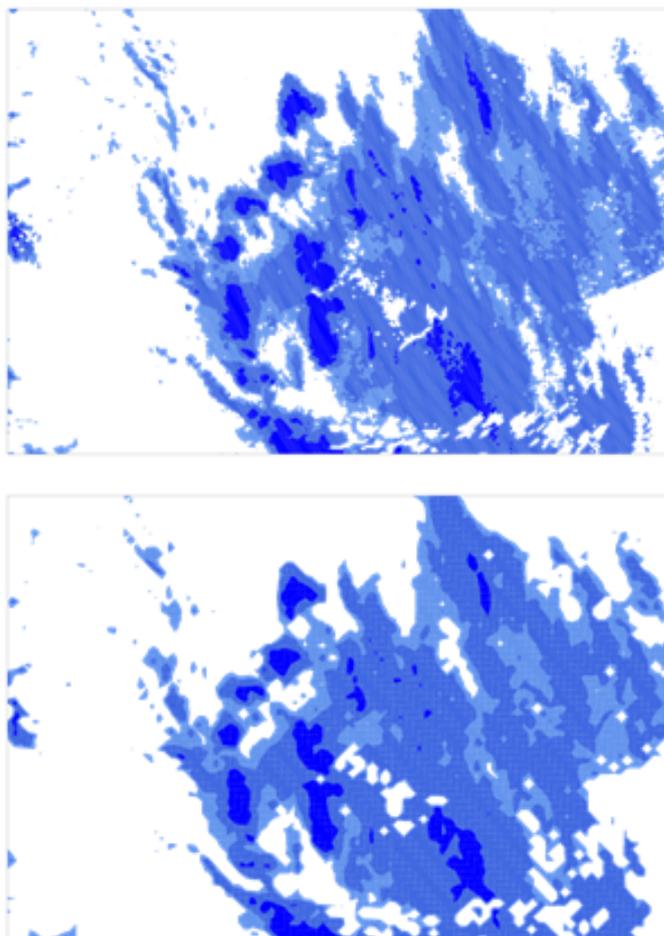


Abbildung IV.9.: Exemplarische Darstellung der Abbildung von Daten des Precipitation-Scans des deutschlandweiten Radarnetzwerks auf das COSMO-DE Modellgitter.

auf das COSMO-DE Gitter abgebildet. Für die Nowcasting-Schritte werden die Reflektivitätsfelder danach mit Hilfe von Verschiebungsvektoren, die durch die Anwendung des am Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt entwickelten Pyramidel-Image-Matcher ermittelt werden, verlagert.

Abbildung der Radardaten auf das COSMO-DE Gitter Analog zu Gleichung IV.5 wird für jeden Gitterpunkt des COSMO-DE Modellgitters der nächstgelegene Gitterpunkt des mit 1 km räumlich hochaufgelösten Radarnetzwerks ermittelt. Der Reflektivitätswert dieses Gitterpunkts wird auf den Modellgitterpunkt abgebildet. Durch diese Methode werden die 110756 Gitterpunkte, die sich im Bereich des Untersuchungsgebiets befinden, auf $125 * 103 = 12875$ reduziert und es gehen etliche Informationen der Originalmessung verloren. Dennoch bleibt so die gene-

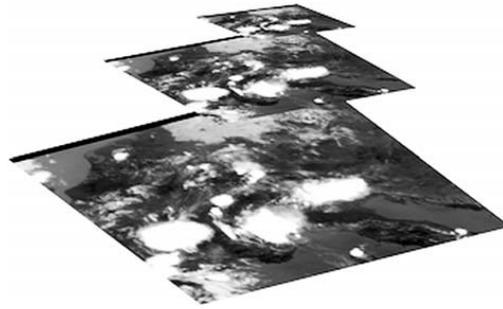


Abbildung IV.10.: *Pyramidal-Image-Matching-Verfahren mit drei Schichten ($N=2$). In der obersten Schicht (Dimensionen $n_x/4$, $n_y/4$) wird das Feld der Verschiebungsvektoren für großskalige Strömungen ermittelt. Das Feld wird dann in den höheren Auflösungen (Dimensionen $n_x/2$, $n_y/2$ bzw. Originaldimensionen n_x , n_y) sukzessive verfeinert. Abbildung aus Zinner u. a. (2008).*

relle Struktur des Reflektivitätsfeldes erhalten, da keine Daten zum Beispiel durch Interpolation verändert werden. Abbildung IV.9 zeigt ein exemplarisches Ergebnis der Methode.

Nowcasting von Radarreflektivitäten: Das Pyramidal-Image-Matching-Verfahren und seine Anwendung in WHITE

Das Pyramidal-Image-Matching-Verfahren wurde am Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt entwickelt (Keil & Craig, 2007; Mannstein u. a., 1999) und wird beispielsweise in den beiden Nowcasting-Systemen Cb-TRAM (Cumulonimbus Tracking and Monitoring) (Zinner u. a., 2008) und Rad-TAM (Radar Tracking and Monitoring) (Kober & Tafferner, 2009) verwendet. Cb-TRAM identifiziert durch eine Kombination mehrerer Kanäle des Meteosat Second Generation SEVIRI Instruments Gewitterwolken in verschiedenen Entwicklungsstadien. Die Zugbahnen dieser Gewitterwolken werden laufend verfolgt und durch den Pyramidal-Image-Matcher eine pixelbasierte Vorhersage erstellt. Rad-TAM ist die Übersetzung desselben Prinzips auf die Datenquelle Radar. In verschiedenen Kompositen können Starkniederschlagsgebiete identifiziert werden, in denen die Reflektivität den Grenzwert 37 dBZ überschreitet. Diese Zellen können ebenfalls verfolgt und für die Vorhersagezeitschritte extrapoliert werden. Beide Systeme arbeiten vollautomatisch und werden mittlerweile von der WxFUSION GmbH (Tafferner & Forster, 2013) kommerziell vermarktet und betreut. Kunden sind beispielsweise der Deutsche Wetterdienst und die Deutsche Flugsicherung.

Der erste Schritt der oben erwähnten Tracking- und Nowcasting-Systeme ist die Bestimmung des Bewegungsfeldes in den Satelliten- bzw. den Radardaten durch den Pyramidal-Image-Matcher. Durch den Vergleich zweier aufeinander folgender Bilder, werden Verschiebungsvektoren für alle Pixel abgeleitet. Die quadrierte Differenz zwischen den Pixeln beider Bilder wird dafür minimiert oder der Korrela-

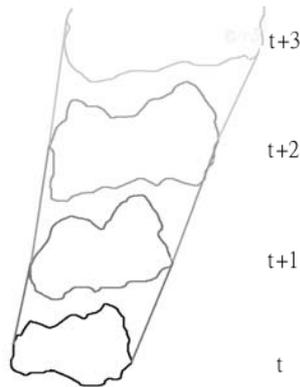


Abbildung IV.11.: Exemplarische Extrapolation einer wachsenden Niederschlagszellstruktur für verschiedene Nowcasting-Zeitschritte. Abbildung aus Zinner u. a. (2008).

tionskoeffizient beider Bilder maximiert. Um zu berücksichtigen, dass kleinskalige Entwicklungen der Niederschlagsfelder von größerskaligen synoptischen Bewegungen überlagert werden können, wird eine stufenweise oder pyramidenförmige Methode implementiert. Durch die Mittelung über 2^N Pixel werden zunächst aus den Originalbildern Bilder mit größeren Auflösungen erzeugt (vgl. Abbildung IV.10). Diese Bilder geben nur die groben Strukturen wieder. Für jedes Pixel wird nun ein Verschiebungsvektor bestimmt, indem ein Bild um zwei Pixel in alle vier horizontalen Richtungen verschoben wird und die beste Übereinstimmung mit dem anderen Bild ermittelt wird. Anschließend wird das Feld der Verschiebungsvektoren auf die maximale Auflösung interpoliert. Diese Prozedur wird für jeden der N Schritte auf den immer höher aufgelösten Bildern durchgeführt. Das finale Feld der Verschiebungsvektoren beinhaltet so die Information aus den unterschiedlichen Skalenbereichen. Für die Ableitung von Nowcasting-Feldern werden die Bildpixel mit den finalen Verschiebungsvektoren extrapoliert. Der große Vorteil dieser Verwendung von Verschiebungsvektoren für jede Pixelposition im Vergleich zur Verwendung eines Vektors für beispielsweise eine komplette Niederschlagszelle ist, dass sich die Größe und die Form von Niederschlagsstrukturen während des Nowcastings ändern können. Es wird also nicht nur die Zuggeschwindigkeit, sondern auch der reale Trend der Zellentwicklung berücksichtigt. Eine im aktuellen Zeitschritt wachsende Zelle wird auch im Nowcasting weiter wachsen, eine abnehmende Zelle sich weiter verringern (Kober & Tafferner, 2009). Abbildung IV.11 zeigt dies exemplarisch für eine wachsende Zellstruktur.

In WHITE wird die bewährte Methode des Pyramidal-Image-Matching-Verfahren übernommen, um für die Nowcasting-Schritte Reflektivitätsfelder zu bestimmen. Eingehende Felder sind die auf das COSMO-DE Gitter abgebildeten Reflektivitäten des Precipitation-Scans. Da die Daten des deutschlandweiten Komposits in fünfminütiger Auflösung vorliegen, wird das Feld der Verschiebungsvektoren als gewichtetes Mittel aus dem Vergleich des jeweils aktuellen Bildes mit dem 5,

10, 15 bzw. 30 Minuten alten Bild ermittelt. Dabei werden jeweils $N = 3$ größere Auflösungen im Pyramidal-Image-Matcher implementiert. Der finale Verschiebungsvektor jedes Pixels für das 15-Minuten-Nowcasting berechnet sich jeweils aus:

$$\vec{V}_{15} = \left(\frac{6x_5 + 1,5x_{10} + x_{15}}{\frac{4}{6y_5 + 1,5y_{10} + y_{15}}} \right) = \begin{pmatrix} 1,5x_5 + 0,375x_{10} + 0,25x_{15} \\ 1,5y_5 + 0,375y_{10} + 0,25y_{15} \end{pmatrix}.$$

x_t und y_t sind dabei die horizontalen Verschiebungskomponenten jedes Pixels, die aus dem Vergleich mit der Messung t Minuten zuvor ermittelt werden. Der Verschiebungsvektor jedes Pixels für das 30-Minuten-Nowcasting wird unter Berücksichtigung der 30 Minuten alten Messung berechnet aus:

$$\vec{V}_{30} = \begin{pmatrix} \frac{4x_{15} + x_{30}}{3} \\ \frac{4y_{15} + y_{30}}{3} \end{pmatrix} = 1,33\vec{V}_{15} + \begin{pmatrix} 0,33x_{30} \\ 0,33y_{30} \end{pmatrix}.$$

Für das 60-Minuten-Nowcasting wird das 30-Minuten-Nowcasting-Bild ein weiteres Mal anhand der Verschiebungsvektoren \vec{V}_{30} extrapoliert. Das 120-Minuten-Nowcasting ist das Resultat der Extrapolation des 60-Minuten-Nowcastings um jeweils $2 * \vec{V}_{30}$. Letztendlich sind als Resultat der Präprozessierung aller eingehenden Daten sowohl Temperatur- und Feuchtefelder als auch Reflektivitätsfelder für den Analysezeitpunkt und alle Nowcasting-Schritte auf einem einheitlichen Rengitter vorhanden.

IV.3.3. Modul 3: Die Winterwetterszenarien in WHITE

In WHITE werden die Winterwettersituationen Schnee, Mischniederschlag, gefrierende Niederschläge, Eisregen und Vereisung in stratiformer Bewölkung berücksichtigt. Um diese Situationen bestmöglich zu erfassen, werden Szenarien definiert, die die mikrophysikalischen Entstehungsprozesse des Winterwetters in ihre entscheidenden Parameter zerlegen. Durch die Definition mathematischer Fuzzy-Sets für diese Parameter ist es möglich Indikatoren für jedes Szenario zu berechnen. Diese Berechnung wird sowohl für die jeweiligen Analysefelder als auch für die in Modul 2 (vgl. Kapitel IV.3.2) abgeleiteten Nowcasting-Felder durchgeführt. Die Indikatoren bilden die Datengrundlage für eine anschließende Klassifikation.

IV.3.3.1. Die Winterwetterszenarien und das vertikale Wetterobjekt

Um die Winterwettersituationen Schnee, Mischniederschlag, gefrierende Niederschläge, Eisregen und Vereisung in stratiformer Bewölkung zu beschreiben, werden die Szenarien „Warme Nase“, „Schnee/Regen“ und „Vereisung in Wolken (SLD)“ definiert. Zusätzlich wird ein Szenario „Verdunstung“ eingeführt, um die eventuell auftretende Sublimation oder Verdunstung fallender Niederschlagsteilchen zu

erfassen. Für die Untersuchung der Bodenverhältnisse wird das Szenario „Boden“ definiert. Der Grundgedanke der Szenarien ist, die Vertikalprofile von Temperatur und Feuchte zu analysieren und wetterentscheidende Bereiche zu erkennen. Diese Bereiche können beispielsweise eingelagerte Schmelzschichten, am Boden aufliegende Kaltluftschichten oder Wolkenobergrenzen sein. Durch das Erkennen dieser Bereiche lassen sich über die Profile vertikale Wetterobjekte definieren, die das Wettergeschehen in unterschiedlichen Höhenschichten eindeutig beschreiben. Der Begriff des vertikalen Winterwetterobjekts beschreibt also ein Luftvolumen bestehend aus mehreren Schichten, die sich durch ihre Information bezüglich Winterwetter, dem Wettergehalt, unterscheiden. Im Folgenden werden zunächst die Szenarien anhand der Vertikalprofile von Temperatur und Taupunkt definiert und entscheidende Parameter identifiziert. Im Anschluss wird für jedes so definierte Szenario eine Fuzzy-Logik implementiert und aussagekräftige Indikatoren berechnet. Durch die spätere Zusammenfassung (vgl. Kapitel IV.3.4) benachbarter vertikaler Objekte können in jeder Modellschicht horizontale Polygone gebildet werden, die eine flächendeckende Untersuchung ermöglichen und aus denen sich weitere Attribute wie zum Beispiel Ausbreitungsrichtung und -geschwindigkeit oder Gültigkeitszeitraum ableiten lassen.

Warme Nase Ein typisches Charakteristikum für die Entstehung von gefrierendem Regen ist eine eingelagerte Warmluftschicht (vgl. Abbildung IV.12). Fester Niederschlag bildet sich in der Kaltluftschicht oberhalb der warmen Nase. In der Warmluftschicht schmilzt er auf, in der darunterliegenden Kaltluftschicht unterkühlt der jetzt flüssige Niederschlag (vgl. Kapitel II.4.2). Bestimmend für das Wetter am Boden ist also, ob der Niederschlag in der Schicht mit positiven Temperaturen komplett schmilzt und ob er in der unteren Kaltluftschicht wieder gefriert. Das vertikale Ausmaß und die Intensität beider Schichten sind die entscheidenden Parameter, um in einer derartigen Situation zwischen gefrierendem Regen, Eisregen und Regen unterscheiden zu können. Deswegen werden im Szenario „Warme Nase“ der Schmelzparameter β_m und der Gefrierparameter β_f eingeführt:

$$\beta_m = T_{max} \Delta Z_m$$

$$\beta_f = T \Delta Z_f$$

Der Schmelzparameter wird einmalig aus der maximalen Temperatur in der warmen Nase T_{max} und der vertikalen Distanz ΔZ_m zwischen Obergrenze Z_m und Untergrenze Z_f der warmen Nase berechnet. In jeder Modellschicht unterhalb der warmen Nase wird der Gefrierparameter aus der Temperatur T und dem vertikalen Abstand zur Untergrenze der warmen Nase $\Delta Z_f = Z_f - Z$ bestimmt. Da mit Celsius-Temperaturen gerechnet wird, ist der Gefrierparameter negativ, so lange die Temperatur in der Schicht negativ ist. In einer eventuell vorhandenen

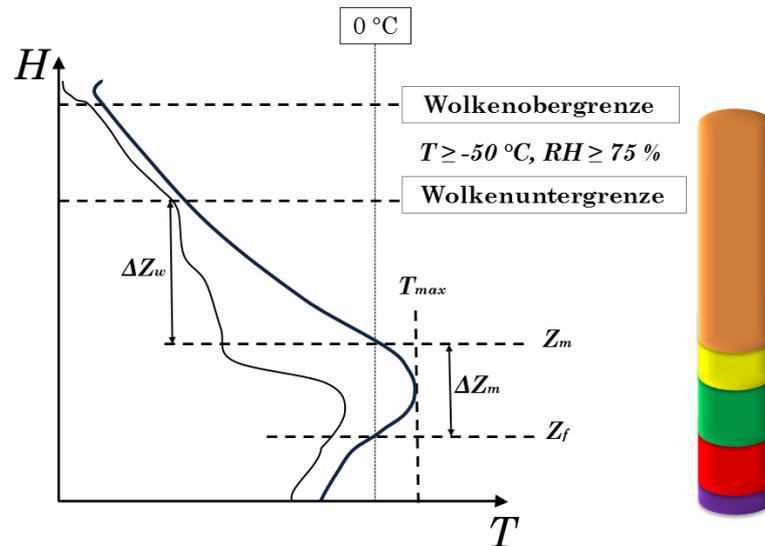


Abbildung IV.12.: Vertikalprofile von Temperatur (dicke Kurve) und Taupunkt (dünne Kurve) als Beispiel für das Winterwetterzenario „Warme Nase“. Die Balken am rechten Rand der Abbildung symbolisieren exemplarisch das vertikale Winterwetterobjekt. Schnee (Orange) in den oberen Luftschichten schmilzt in der warmen Luftschicht erst teilweise zu Mischniederschlag (Gelb) und anschließend vollständig zu Regen (Grün). In der kalten Luftschicht unterkühlt der Regen zu gefrierendem Niederschlag (Rot) und gefriert anschließend zu Eisregen (Violett).

weiteren Warmluftschicht unterhalb der unterkühlten Schicht, ist der Gefrierparameter dagegen positiv. Nimmt die Temperatur mit abnehmender Höhe zu, wird in den tieferliegenden Modellschichten aber auch der minimale Gefrierparameter übernommen, solange die Temperatur den Nullpunkt nicht überschreitet. Hintergedanke ist, dass einmal unterkühlter Niederschlag auch bei wärmeren aber weiterhin negativen Temperaturen unterkühlt bleibt. Der Ansatz mit Schmelz- und Gefrierparameter ist in Anlehnung an die Arbeiten von Theriault & Stewart (2007, 2010) und Theriault u. a. (2006, 2010) entstanden. Dort werden beide Parameter eingeführt, um Niederschlagstypen in Winterwittersituationen zu simulieren. Wie in Abbildung IV.12 zu erkennen, wird an allen Gitterpunktsäulen in den Temperaturprofilen nach Schmelz- und Gefrierparameter gesucht, wenn oberhalb der warmen Luftschicht eine niederschlagsfähige Wolke vorhanden ist. In Anlehnung an Tafferner u. a. (2003) und Leifeld (2004) ist eine niederschlagsfähige Wolke definiert über das Temperatur- und Feuchteprofil. Beträgt die relative Feuchte mehr als 75 % bei einer gleichzeitigen Temperatur von mehr als -50 °C und ist der vertikale Abstand ΔZ_w zwischen Wolkenuntergrenze und warmer Nase kleiner als 3000 m, so wird eine niederschlagsfähige Wolke erkannt. Ist der Abstand hingegen größer, also existiert ein Bereich unterhalb der Wolke, in der die relative Feuchte

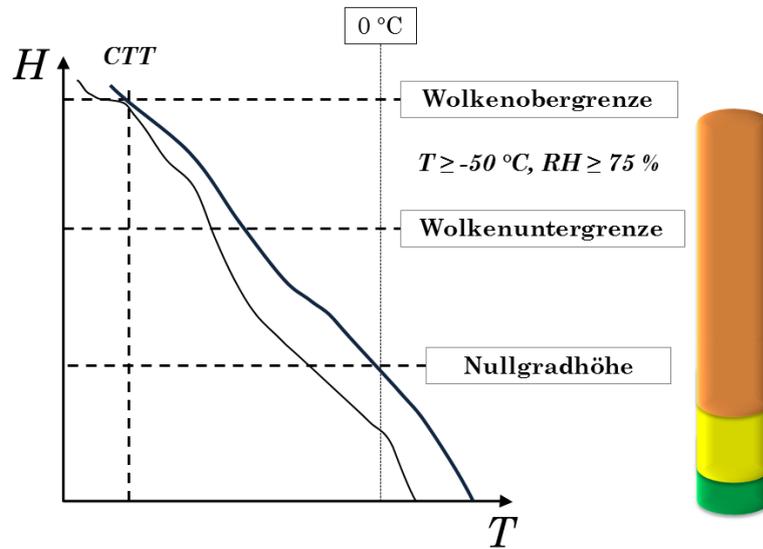


Abbildung IV.13.: Vertikalprofile von Temperatur (dicke Kurve) und Taupunkt (dünne Kurve) als Beispiel für das Winterwetterobjekt „Schnee/Regen“. Die Balken am rechten Rand der Abbildung symbolisieren exemplarisch das vertikale Winterwetterobjekt. Schnee (Orange) in den oberen Luftschichten schmilzt in der warmen Luftschicht erst teilweise zu Mischniederschlag (Gelb) und anschließend vollständig zu Regen (Grün).

durchgehend weniger als 75 % beträgt, wird davon ausgegangen, dass potentieller Niederschlag in diesem Bereich wieder verdunstet.

Schnee/Regen Dieses Szenario beschreibt den klassischen Fall der Entstehung von Wolkeneis und Schnee sowie von flüssigem Niederschlag über den Kalter-Regen-Prozess (vgl. Kapitel II.4.1). In der unterkühlten Wolke entstehen feste Niederschlagsteilchen durch die in den Kapiteln II.1 mit II.3 ausführlich beschriebenen Mechanismen. Dieser feste Niederschlag schmilzt im Beispiel von Abbildung IV.13 in einer am Boden aufliegenden warmen Luftschicht zunächst teilweise und mit zunehmendem Fallweg komplett zu Regentropfen. Ist die Schicht mit positiven Temperaturen nicht mächtig oder intensiv genug, erreicht der Niederschlag den Boden als Mischniederschlag oder als Schnee. Als entscheidender Parameter wird auch für dieses Szenario der Schmelzparameter β_m eingeführt.

$$\beta_m = T \Delta Z_m$$

Der Parameter wird für alle Modellschichten unterhalb der Nullgradhöhe berechnet. ΔZ_m ist in diesem Fall der vertikale Abstand zwischen der Nullgradhöhe und

der jeweiligen Modellschicht. Ist die Temperatur in Bodennähe inversiv geschichtet ohne erneut den Gefrierpunkt zu erreichen, so wird analog zum Vorgehen beim Gefrierparameter des Szenarios „Warme Nase“ der maximale Schmelzparameter für die tieferliegenden kälteren Modellschichten übernommen. Ein Niederschlagsteilchen, das in der Höhe mit maximaler Temperatur bereits geschmolzen ist, bleibt naturgemäß auch in der etwas kälteren, aber immer noch warmen Luft seines weiteren Fallwegs in der flüssigen Phase.

Wie in den Kapiteln II.1 bis II.3 gezeigt wurde, ist ein weiterer entscheidender Parameter die Temperatur an der Wolkenobergrenze. Ist diese niedrig, ist die Wahrscheinlichkeit für feste Niederschlagsteilchen in der Wolke hoch. Im Szenario „Schnee/Regen“ wird in jeder Gitterpunktsäule nach Wolken in den Profilen von Temperatur- und Taupunkt gesucht. Auch hier ist die Wolke definiert als die Luftschicht, in der gilt $T > -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $RH > 75\%$. Zusätzlich darf der vertikale Abstand zwischen Wolkenunterkante und Boden auch hier nicht mehr als 3000 m betragen. Unterschreiten die Temperatur oder die relative Feuchte bei der sukzessiv nach oben orientierten Profilanalyse den Grenzwert, so wird diese Modellhöhe als Wolkenobergrenze festgelegt. Die Temperatur dieser Wolkenobergrenze (CTT: Cloud Top Temperature) wird aus dem Temperaturprofil ermittelt. Da im Winter Wetterlagen existieren können, in denen mehrere horizontale Niederschlagswolken übereinander geschichtet sind, wird nach weiteren potentiellen Wolkengebieten und den entsprechenden CTTs oberhalb der untersten Wolkenschicht gesucht. Beträgt der Abstand zwischen den einzelnen Wolkenschichten nicht mehr als 3000 m, wird die CTT der obersten Wolke als Eingangsparameter in die Fuzzy-Logik verwendet. Kann in den Profilen keine Wolke identifiziert werden, obwohl im Radarsignal Reflektivität an diesem Gitterpunkt gemessen wird, so wird in der Umgebung des Gitterpunkts nach der nächstgelegenen Wolkenobergrenze gesucht und dessen Wert übernommen. Der dritte entscheidende Parameter, der aber im Vergleich zu den beiden anderen Parametern einen geringeren Einfluss hat, ist die relative Feuchte in jeder Modellschicht unterhalb der Nullgradhöhe. Je gesättigter die Luft in Bezug auf Wasser ist, desto weniger Schmelzwasser verdunstet während des Fallens und desto weniger latente Wärme wird dem System entzogen. Die Wahrscheinlichkeit für flüssigen Niederschlag ist bei großer relativer Feuchte erhöht.

Vereisung in Wolken (SLD) Neben den winterlichen Niederschlägen ist Vereisung ein typisches Problem des Luftverkehrs. In WHITE wird diese Gefährdung durch die Untersuchung des potentiellen Auftretens von unterkühltem Flüssigwasser in stratiform geschichteten Wolken berücksichtigt. Angelehnt an das ADWICE Vereisungsszenario *stratiform* (Leifeld, 2004) wird das mögliche Vorkommen von SLD beurteilt. Der theoretische Grundgedanke dieses Szenarios ist die Bildung dieser großen unterkühlten Tropfen über die Koagulationsmechanismen des Warmen-Regen-Prozesses (vgl. Kapitel II.4.3). Da unterkühltes Flüssigwasser bevorzugt bei

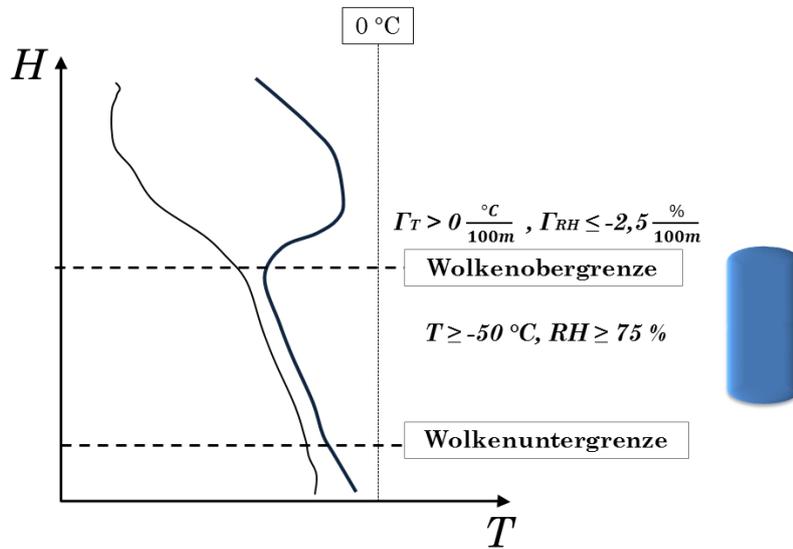


Abbildung IV.14.: Vertikalprofile von Temperatur (dicke Kurve) und Taupunkt (dünne Kurve) als Beispiel für das Winterwetterszenario „Vereisung in Wolken (SLD)“. Die Balken am rechten Rand der Abbildung symbolisieren exemplarisch das vertikale Winterwetterobjekt. Unterhalb der klar definierten Obergrenze besteht innerhalb der Wolke mit unterkühltem Flüssigwasser potentielle Vereisungsgefahr durch SLD (Blau).

leicht negativen Celsiusstemperaturen auftritt, ist die Temperatur in jeder Luftschicht innerhalb einer Stratuswolke der erste entscheidende Parameter dieses Szenarios. Eine Stratuswolke ist in diesem Fall definiert über die Gradienten von Temperatur und relativer Feuchte. Unterschreitet der Feuchtegradient Γ_{RH} den Wert von $-2,5\%/100\text{m}$ bei gleichzeitiger Temperaturinversion ($\Gamma_T > 0\text{ °C}/100\text{m}$), wird in der entsprechenden Modellschicht eine klar definierte Obergrenze einer Schichtwolke erkannt. Wie in den Szenarien zuvor, muss zusätzlich die relative Feuchte in den Modellschichten unterhalb der Oberkante mehr als 75% betragen und die Temperatur einen Wert größer als -50 °C aufweisen. Auch in diesem Szenario wird nach weiteren Wolkenschichten oberhalb der ersten und untersten Schicht gesucht, wobei hier die vertikale Distanz zwischen den Wolkenschichten mehr als 3000 m betragen muss. Andernfalls könnte fester Niederschlag aus den höheren Wolken in den tieferen Wolkenschichten mit unterkühltem Flüssigwasser den Vereisungsprozess initiieren. Dieses Phänomen wird als seeder-feeder-Effekt bezeichnet. Ein zweiter entscheidender Parameter ist die relative Feuchte in jeder Modellschicht innerhalb der Wolken. Je gesättigter dort die Luft ist, desto mehr Flüssigwassergehalt wird angenommen. Diese stark vereinfachte Annahme wird ergänzt durch die Hinzunahme der Radarreflektivität als dritten entscheidenden Parameter. Selbst die sehr großen unterkühlten Tropfen mit einer Größe von ca. $30\text{ }\mu\text{m}$ sind in der

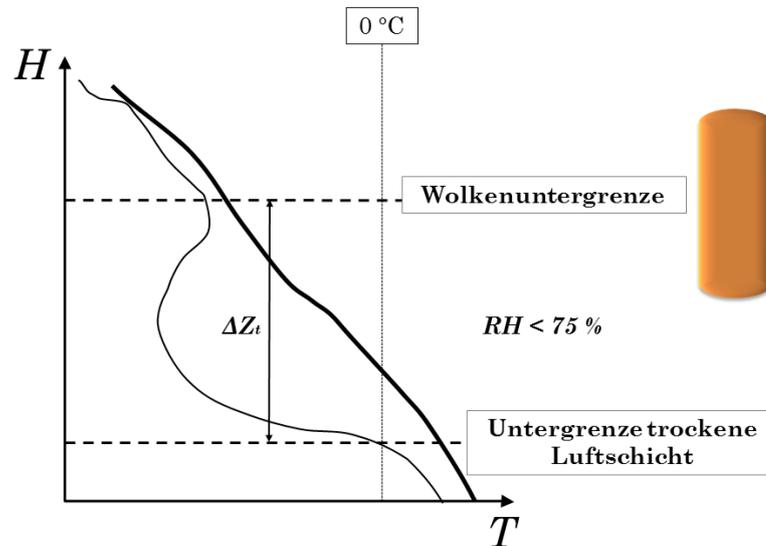


Abbildung IV.15.: Vertikalprofile von Temperatur (dicke Kurve) und Taupunkt (dünne Kurve) als Beispiel für das Winterwetter Szenario „Verdunstung“. Die Balken am rechten Rand der Abbildung symbolisieren exemplarisch das vertikale Winterwetterobjekt. Schnee (Orange), gebildet in hohen Luftschichten verdunstet in der trockenen Luftschicht unterhalb der Wolke. Am Boden wird kein Niederschlag beobachtet.

Regel zu klein um deutlich erkennbare Niederschlagsstrukturen zu bilden. Ist die Reflektivität am Gitterpunkt also sehr groß, muss davon ausgegangen werden, dass der Niederschlag dort über andere Prozesse gebildet worden ist und sich keine signifikante Anzahl an unterkühlten Tropfen in der Wolke befinden. Analog zum Szenario „Schnee/Regen“ wird auch im Szenario „Vereisung in Wolken (SLD)“ die Wolkenobergrenze aus benachbarten Gitterpunkten übernommen, falls in den Profilen keine Wolke detektiert werden kann, es aber ein Radarreflektivitätssignal am jeweiligen Gitterpunkt gibt.

Verdunstung Ist zwischen der niederschlagsfähigen Wolke und dem Boden eine trockene Schicht eingelagert, so kann fallender Niederschlag in der trockenen Schicht verdunsten, ohne den Boden zu erreichen. Für die Definition dieses Szenarios werden das vertikale Ausmaß der trockenen Schicht ΔZ_t und die Radarreflektivität als entscheidende Parameter verwendet. Eine trockene Schicht ist in diesem Szenario definiert über die Modellschichten, in denen die relative Feuchte weniger als 75 % beträgt. In den Szenarien „Schnee/Regen“, „Warme Nase“ und „Vereisung in Wolken (SLD)“ werden Gebiete mit einer relativen Feuchte von mehr als 75 % als potentielle Wolken identifiziert. Beträgt die vertikale Distanz zwischen

den Wolkenschichten mehr als 3000 m, so wird davon ausgegangen, dass vorhandener Niederschlag in dieser trockenen Schicht verdunstet. Dieser Maximalwert hat auch im Szenario „Verdunstung“ Gültigkeit. Ist die Niederschlagsintensität aber sehr gering, kann fallender Niederschlag auch bereits in Verdunstungszonen geringeren Ausmaßes wieder in die Gasphase übergehen. Das Szenario „Verdunstung“ berücksichtigt für schwache Reflektivitäten diese Möglichkeit und wird in WHITE im Anschluss an die Niederschlagsszenarien berechnet. Ziel ist die Bestimmung der Verdunstungshöhe in der bodennahen Luftschicht an jedem Gitterpunkt. Wird Verdunstung erkannt, so werden alle Modellschichten unterhalb der berechneten Höhe beim Output ignoriert.

Boden Für die Verkehrsleitung von Flughäfen ist die Kenntniss über die Bodenverhältnisse auf den Start- und Landebahnen sowie auf den restlichen Bewegungsflächen von elementarer Bedeutung. Kapitel II.5.1 und Kapitel III.2 zeigen, welche Probleme und Konsequenzen sich am Flughafen München bei mit Schnee oder Eis kontaminierten Flächen ergeben. Die Fragestellung, ob am Boden Neuschneeakkumulation auftreten wird oder ob flüssiger Niederschlag auf einem unterkühlten Untergrund zu Glatteis wird, lässt sich nur beantworten, wenn man Informationen über die Bodentemperatur besitzt. Auch der Niederschlagstyp in der bodennahen Modellschicht und die Intensität des Niederschlags müssen bekannt sein.

In WHITE werden zur Bestimmung der Bodenverhältnisse zwei Unterszenarien für den Boden eingeführt. Das erste Unterszenario wird als „Neuschnee“ bezeichnet und beurteilt die Akkumulation von Schnee zum jeweiligen Analyse- oder Nowcasting-Zeitpunkt. Neben der Bodentemperatur und der Radarreflektivität, ist der Fuzzy-Indikator der untersten Modellschicht des Szenarios „Schnee/Regen“ der entscheidende Parameter. Je höher dieser Indikator ist, desto sicherer muss von festem Niederschlag in Form von Schnee an diesem Gitterpunkt ausgegangen werden. Ist der Boden gleichzeitig unterkühlt bzw. die Intensität des Niederschlags entsprechend hoch, so wird dieser Schnee mit großer Wahrscheinlichkeit am Boden akkumulieren und eine Neuschneedecke bilden. Das zweite Unterszenario „Glatteis“ berücksichtigt die Gefahr der Entstehung von Glatteis bei flüssigem Niederschlag. Dieses Unterszenario kommt ohne Umwandlung in ein eigenes Fuzzy-Set aus. Wird am Gitterpunkt in der untersten Modellschicht unterkühlter Niederschlag erwartet, wird für den Boden Glatteisgefahr ausgegeben, falls die Bodentemperatur nicht mehr als 1 °C beträgt. Auch wenn warmer flüssiger Niederschlag erwartet wird, wird bei gleichzeitigen negativen Bodentemperaturen die Situation im Hinblick auf Glätte als potentiell gefährlich bewertet.

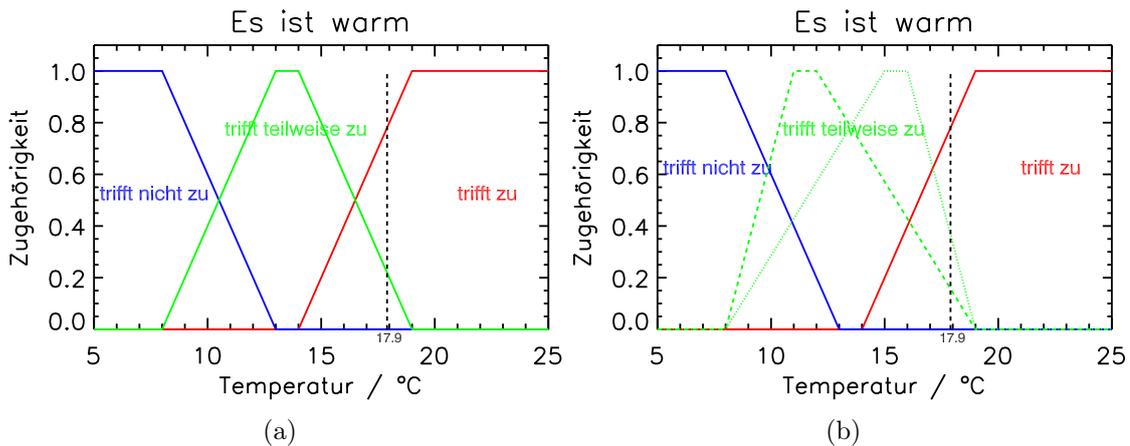


Abbildung IV.16.: Trapezförmige Zugehörigkeitsfunktionen für die Beurteilung der Aussage „Es ist warm“. In (a) ist ein symmetrischer Ansatz gezeigt. Die Verschiebung des mittleren Trapez in (b) nach links (gestrichelte grüne Linie) bzw. nach rechts (gepunktete grüne Linie) führt zu einer unsymmetrischen Verteilung der Zugehörigkeiten für den Wert $17,9^{\circ}\text{C}$.

IV.3.3.2. Die Entwicklung der Fuzzy-Sets

Im Gegensatz zur klassischen binären Logik, in der nur die beiden Aussagen wahr oder falsch zulässig sind, verwertet 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 dient dazu, Unschärfen mathematisch handhabbar zu machen. Sie wird in der menschlichen Denkweise und Entscheidungsfindung oft wie selbstverständlich angewandt. Alltägliche Probleme wie zum Beispiel „Kann ich noch vor dem Auto die Straße überqueren?“ oder „Wie warm muss ich mich heute anziehen?“ können durch einen bivalenten Ansatz nur schwer gelöst werden. Begriffe wie Geschwindigkeit, Entfernung, Risikobereitschaft, Temperatur und Wärmeempfinden haben alle eine gleitende Skala und können nicht über exakte Grenzwerte generell festgelegt werden. Um beispielsweise den Term „es ist warm“ zu definieren, könnte ein Grenzwert von 20°C passend erscheinen. Doch sicher könnte auch eine Temperatur von 19°C oder 18°C noch als warm akzeptiert werden. Wo also soll die Grenze gezogen werden? Ist für eine Temperatur von $17,9^{\circ}\text{C}$ die Aussage „es ist warm“ nicht mehr zulässig, wenn sie es doch für 18°C noch ist? Die Fuzzy-Logik bietet einen Ausweg aus diesem Dilemma, indem sie dem Wert $17,9^{\circ}\text{C}$ Zugehörigkeiten zu mehreren unscharfen Mengen zuweist (Klir & Yuan, 1995). Abbildung IV.16(a) visualisiert das eben angesprochene Beispiel anhand von trapezförmigen Fuzzy-Mengen. $17,9^{\circ}\text{C}$ wird in diesem Fall zu 30% der Kategorie „trifft teilweise zu“ und zu 70% der Kategorie „trifft

zu“ zugewiesen. Zadeh (1965) entwickelte bereits vor gut 50 Jahren mathematische Modelle wie diese, 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 Verkehrsleittechnik und eben auch der Meteorologie Einzug gehalten (Keis & Tafferner, 2014).

Die Fuzzy-Logik bietet neben der Verwendung von trapezförmigen Fuzzy-Mengen auch die Möglichkeit die Zugehörigkeiten über beliebige andere Funktionen zu definieren. Beispiele wie die Dreiecksfunktion, die Gaußglocke oder die Sigmoidal-Funktionen werden in Abbildung IV.17 gezeigt. Bei der Definition von solchen Fuzzy-Set-Funktionen oder Zugehörigkeitsfunktionen ist die in Abbildung IV.16(a) gezeigte Symmetrie nicht zwangsläufig notwendig. Liegen stichhaltige Gründe vor, die einem symmetrischen Übergang der Zugehörigkeiten widersprechen, müssen die zugewiesenen Werte nicht das komplette Intervall von 100 % abdecken. So könnte der Wert 17.9 °C beispielsweise auch nur zu 20 % der Kategorie „trifft teilweise zu“ zugewiesen werden. Genauso wäre eine Festsetzung von 40 % möglich. Die symmetrischen Trapezfunktionen in Abbildung IV.16(a) würden sich dementsprechend zu den unsymmetrischen Funktionen in Abbildung IV.16(b) verschieben. In dieser Arbeit wird ausschließlich mit symmetrischen trapezförmigen Ansätzen gearbeitet, da sie für die verwendeten Parameter und berücksichtigten Szenarien die plausibelste Herangehensweise darstellen. Weitere intensive Forschungen während der kommenden Winter und eine Ausdehnung der Datengrundlage eröffnen aber eventuell Potential für Weiterentwicklungen in diesem Bereich. Im Rahmen eines Praktikums in der Abteilung Wolkenphysik und Verkehrsmeteorologie des Instituts für Physik der Atmosphäre wurde bereits für ausgewählte Fallbeispiele mit der Verwendung von teilweise unsymmetrischen logarithmischen, parabelförmigen, sigmoidalen und treppenförmigen Zugehörigkeitsfunktionen experimentiert. Ein erster Eindruck deutet darauf hin, dass im Einzelfall durchaus unterschiedliche Fuzzy-Indikatoren für die gleichen Eingangsgrößen entstehen können und dadurch die Klassifikation der Winterszenarien variiert. Allerdings ließ sich aus den wenigen verfügbaren Fallbeispielen kein eindeutiger Trend ableiten und es konnte keine klare Aussage über die Qualität unterschiedlicher Funktionen für die WHITE-Szenarien getroffen werden.

Um zu einer Entscheidung zu kommen, müssen in der Regel mehrere Faktoren gegeneinander abgewogen werden. Im Beispiel der Fragestellung „Kann ich noch vor dem Auto die Straße überqueren?“ werden neben der Geschwindigkeit des Fahrzeugs, dessen Entfernung, die Breite der Straße und die persönliche Laufbereitschaft automatisch im Entscheidungsprozess berücksichtigt. Die Fuzzy-Logik ist ebenfalls in der Lage, mehrere eingehende Informationen zu verarbeiten und einen präzisen Wert als Ergebnis zu berechnen. Dieses Ergebnis zeigt an, mit welcher Entscheidung bei vorliegender Datenlage am ehesten gerechnet werden muss und wird im Folgenden als Indikator bezeichnet. Für die Kombination mehrerer

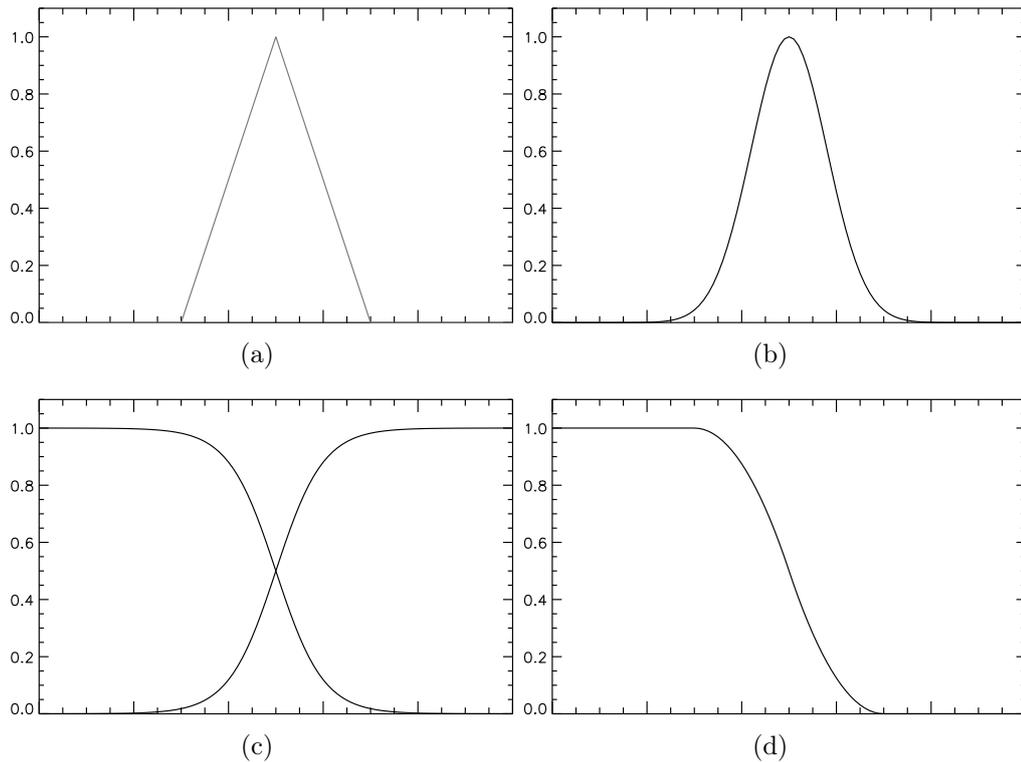


Abbildung IV.17.: Mögliche Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Logik: (a) Dreiecksfunktion, (b) Gauß-Kurve, (c) Sigmoidal-Funktion, (d) Z-Funktion.

Informationsquellen mit Fuzzy-Logik müssen drei Hauptschritte vollzogen werden (Stich, 2013):

- Definition von Fuzzy-Sets für jede Eingangsinformation (*Fuzzifizierung*),
- Festsetzung von Kombinationsregeln und Berechnung von Zugehörigkeiten zu einem Ausgangs-Fuzzy-Set (*Inferenz*),
- Umwandlung der unscharfen Informationen zu einem Indikator (*Defuzzifizierung*).

In WHITE werden für jedes Szenario die entscheidenden Parameter in Fuzzy-Sets kategorisiert. Die entscheidenden Parameter bestimmen das Szenario jeweils eindeutig. Über Fuzzy-Set-Funktionen werden jedem Parameter Zugehörigkeiten zu unterschiedlichen Fuzzy-Mengen zugewiesen. Ein vordefinierter, auf wolkenphysikalischen Grundlagen und meteorologischen Erfahrungen beruhender Regelsatz erlaubt eine sinnvolle Kombination dieser Zugehörigkeiten. Das Ergebnis der Kombinationen wird über die Defuzzifizierung in einen aussagekräftigen Indikator umgewandelt, der ein deutlicher Hinweis ist, wie sehr mit dem jeweiligen Szenario gerechnet werden kann. Die Prinzipien der Kombination und der Defuzzifizierung werden im Folgenden anhand der WHITE-Szenarien verdeutlicht.

gefrierender Regen		Eisregen/Eiskörner		Mischniederschlag	
Schmelzparameter	Gefrierparameter	Schmelzparameter	Gefrierparameter	Schmelzparameter	Gefrierparameter
zu klein	zu klein				zu klein
passend	passend	passend	passend	passend	passend
	zu groß	zu groß	zu groß	zu groß	zu groß

Tabelle IV.1.: *Linguistische Variablen, die eine Zugehörigkeitsklasse beschreiben, im Szenario „Warme Nase“.*

Warme Nase Für das Szenario „Warme Nase“ wurden der Schmelzparameter und der Gefrierparameter als entscheidende Größen identifiziert (vgl. Kapitel IV.3.3.1). Das Szenario wird nur berechnet, wenn im Temperaturprofil eine warme Nase gefunden werden kann. Nur dann hat auch der Schmelzparameter einen von null verschiedenen Wert. Per Definition kann er nur positive Werte annehmen. Es wird innerhalb des Szenarios zwischen der Entstehung von gefrierendem Regen, von Eisregen und Mischniederschlag differenziert.

Tabelle IV.1 zeigt die Klassen, die jeweils berücksichtigt werden. Für gefrierenden Regen ist der Schmelzparameter zu klein, wenn das Ausmaß oder die Intensität einer vorhandenen warmen Nase zu gering ist und fester Niederschlag innerhalb der warmen Schicht nicht schmilzt. Andernfalls ist er passend. Für den Gefrierparameter lassen sich andere linguistische Variablen identifizieren. Je negativer der Parameter ist, desto eher gefrieren unterkühlte Tropfen innerhalb der kalten Luftschicht. Ist er nur schwach negativ oder sogar positiv, wird flüssiger Niederschlag nicht oder nur minimal unterkühlt. Ein positiver Gefrierparameter zeigt an, dass in dieser Höhe bereits wieder positive Temperaturen herrschen. Für gefrierenden Regen kann der Gefrierparameter also zu klein, passend oder zu groß sein. Die Bildung von Eiskörnern in der unterkühlten Schicht setzt ebenfalls ein mindestens partielles Schmelzen in der warmen Luftschicht voraus. Allerdings begünstigt ein unvollständiges Aufschmelzen das erneute Gefrieren sogar, da in diesem Fall bereits ein größerer Gefrierkern vorhanden ist. Das Ausmaß und die Intensität der unterkühlten Schicht sind entweder ausreichend, um die partiell geschmolzenen Teilchen zu Eiskörnern bzw. Eisregen zu transformieren oder sie sind zu gering. Der Schmelzparameter, genauso wie der Gefrierparameter, kann also entweder passend oder zu groß sein. Mischniederschlag in diesem Szenario entsteht, wenn Schneeflocken innerhalb der warmen Luftschicht nur wenig schmelzen und in der Luftschicht darunter nur wenig unterkühlt oder weiter aufgeschmolzen werden. Der Gefrierparameter kann zu kleine, passende oder zu große Werte annehmen, während beim Schmelzparameter die Fuzzy-Mengen passend und zu groß berücksichtigt werden müssen.

Die theoretischen Überlegungen bei der Definition der Fuzzy-Sets wurden durch Ergebnisse aus Fallstudien der Wintermonate 2011/2012 und 2012/2013 über-

prüft. In Abbildung IV.18 werden für die Unterszenarien „gefrierender Regen“ und „Mischniederschlag“ jeweils die relative Häufigkeitsverteilung des Parameters und die entsprechenden Fuzzy-Set-Funktionen präsentiert. Eisregen trat in den Referenzperioden zu selten auf, um eine sinnvolle Häufigkeitsverteilung zu erstellen. Die Fuzzy-Set-Funktionen dieses Unterszenarios werden in Abbildung IV.19 visualisiert. Die Verteilungen zeigen, wie oft der Parameter welchen Wert hatte, wenn eine passende Wettermeldung auf ein Temperaturprofil mit eingelagerter Warmluftschicht traf. Es ist zu erkennen, dass sich auch aus den Ergebnissen der Fallstudien Zugehörigkeitsfunktionen ableiten lassen, die mit den theoretischen Überlegungen gut übereinstimmen.

Um aus den Fuzzy-Sets der einzelnen Eingangsparameter einen greifbaren Wert als Indikator für das Auftreten des Wetterszenarios berechnen zu können, müssen für jedes Szenario Kombinationsregeln definiert werden. Diese Kombinationsregeln stellen einen Satz von Bedingungsgleichungen dar, in denen meteorologisches Fachwissen, Ergebnisse von Fallstudien und langjährige Erfahrungen berücksichtigt werden können. Die Anzahl der Gleichungen entspricht den Kombinationsmöglichkeiten der Fuzzy-Sets. Im Szenario „Warme Nase“ existieren für die Entstehung von gefrierendem Regen zwei Möglichkeiten für den Schmelzparameter und drei Möglichkeiten für den Gefrierparameter. Insgesamt müssen hier also $2 * 3 = 6$ Bedingungsgleichungen aufgestellt werden. Für das Unterszenario „Eisregen/Eiskörner“ existieren $2 * 2 = 4$ Möglichkeiten, für die Entstehung von Mischniederschlag in Verbindung mit einer warmen Nase ebenfalls $3 * 2 = 6$ Kombination. Die Fuzzy-Logik lässt zu, nicht jeder Bedingungsgleichung ein Ergebnis zuzuordnen oder einzelne Kombination stärker zu gewichten als andere. Widersprüchliche Aussagen können zum Beispiel unbeachtet oder nur schwach gewichtet werden. Im WHITE-System sind die Eingangsparameter aber so ausgewählt, dass derartige widersprüchliche Aussagen nicht behandelt werden müssen. In den Tabellen IV.2 bis IV.4 sind die Bedingungsgleichungen für die Unterszenarien des Szenarios „Warme Nase“ aufgelistet.

Durch die Bedingungsgleichungen wird aus den fuzzifizierten Eingangsparametern ein bewertendes Ausgangs-Fuzzy-Set erstellt. Diese Umwandlung wird als Inferenz bezeichnet. In WHITE wird die sogenannte Min-Max-Inferenz angewandt. Dabei wird jede Kombinationsmöglichkeit der eingehenden Parameter einer Zugehörigkeitsklasse in den Ausgangs-Fuzzy-Sets zugewiesen, die wiederum durch eine linguistische Variable definiert ist, z. B. „FZ gering“. Die minimale Zugehörigkeit zu den jeweiligen Fuzzy-Mengen definiert dabei, in welchem Ausmaß die Aussage zutrifft. Sind alle Bedingungsgleichungen abgearbeitet, wird für jede Klasse der maximale Wert ermittelt. Für die Defuzzifizierung, also für die Berechnung eines aussagekräftigen Wertes, wird in WHITE anschließend die Flächenschwerpunkt-Methode angewandt. Die Flächenschwerpunkt-Methode ist die gebräuchlichste Methode der Defuzzifizierung. Andere Methoden sind die Schwerpunktbildung über Singletons oder die Maximum-Methoden der Fuzzy-Ergebnismenge. Diese Metho-

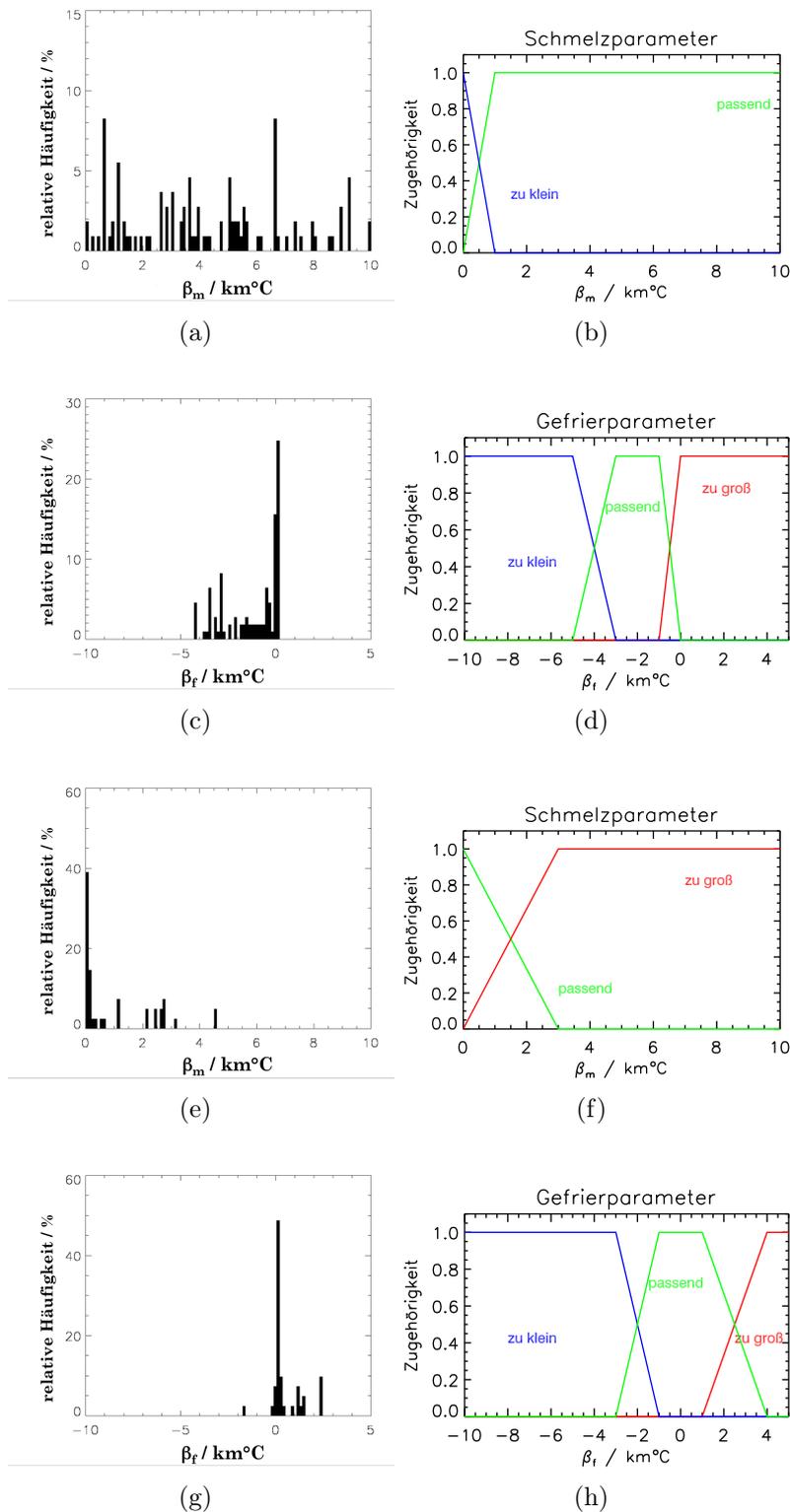


Abbildung IV.18.: Häufigkeitsverteilungen und Fuzzy-Set-Funktionen für Szenario „Warme Nase“. (a) - (d) zeigen Schmelz- und Gefrierparameter für die Entstehung von gefrierendem Niederschlag. (e) - (h) zeigen beide Parameter für die Entstehung von Mischniederschlag in Verbindung mit einer eingelagerten Warmluftsschicht.

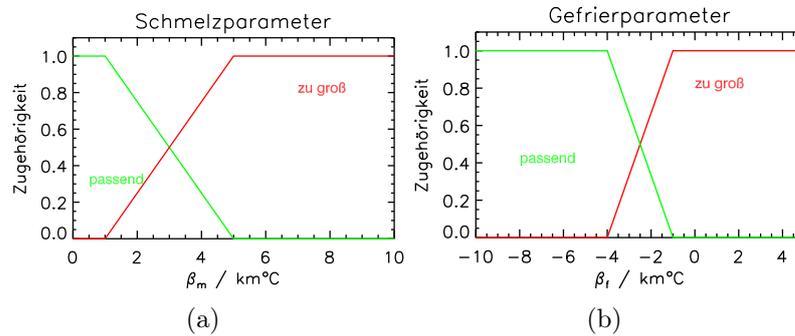


Abbildung IV.19.: Fuzzy-Set-Funktionen des Schmelzparameters (a) und des Gefrierparameters (b) für die Entstehung von Eisregen/Eiskörner im Szenario „Warme Nase“.

- WENN $zu\ klein(\beta_m) > 0$ UND $zu\ klein(\beta_f) > 0$ DANN FZ gering
- WENN $zu\ klein(\beta_m) > 0$ UND $zu\ groß(\beta_f) > 0$ DANN FZ sehr gering
- WENN $zu\ klein(\beta_m) > 0$ UND $passend(\beta_f) > 0$ DANN FZ neutral
- WENN $passend(\beta_m) > 0$ UND $zu\ klein(\beta_f) > 0$ DANN FZ neutral
- WENN $passend(\beta_m) > 0$ UND $zu\ groß(\beta_f) > 0$ DANN FZ neutral
- WENN $passend(\beta_m) > 0$ UND $passend(\beta_f) > 0$ DANN FZ sehr hoch

Tabelle IV.2.: Bedingungsgleichungen für die Entstehung von gefrierendem Regen (FZ) im Szenario „Warme Nase“.

- WENN $passend(\beta_m) > 0$ UND $passend(\beta_f) > 0$ DANN IP sehr hoch
- WENN $passend(\beta_m) > 0$ UND $zu\ groß(\beta_f) > 0$ DANN IP neutral
- WENN $zu\ groß(\beta_m) > 0$ UND $passend(\beta_f) > 0$ DANN IP hoch
- WENN $zu\ groß(\beta_m) > 0$ UND $zu\ groß(\beta_f) > 0$ DANN IP gering

Tabelle IV.3.: Bedingungsgleichungen für die Entstehung von Eisregen/Eiskörner (IP) im Szenario „Warme Nase“.

WENN $passend(\beta_m) > 0$ UND $zu\ klein(\beta_f) > 0$ DANN *MP hoch*
WENN $passend(\beta_m) > 0$ UND $zu\ groß(\beta_f) > 0$ DANN *MP gering*
WENN $passend(\beta_m) > 0$ UND $passend(\beta_f) > 0$ DANN *MP sehr hoch*
WENN $zu\ groß(\beta_m) > 0$ UND $zu\ klein(\beta_f) > 0$ DANN *MP sehr gering*
WENN $zu\ groß(\beta_m) > 0$ UND $zu\ groß(\beta_f) > 0$ DANN *MP sehr gering*
WENN $zu\ groß(\beta_m) > 0$ UND $passend(\beta_f) > 0$ DANN *MP neutral*

Tabelle IV.4.: Bedingungsgleichungen für die Entstehung von Mischniederschlag (MP) im Szenario „Warme Nase“.

den werden in dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt. Der interessierte Leser sei an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen (z.B. Hellendoorn & Thomas 1993, Klir & Yuan 1995 oder Ross 2010). Auch andere Inferenz-Methoden wie die sogenannte Max-Prod-Inferenz können dort nachgeschlagen werden.

Anhand Abbildung IV.20 soll die Vorgehensweise bei der Berechnung der Indikatoren detailliert erläutert werden. Für das Unterszenario „gefrierender Regen“ in Verbindung mit einer warmen Nase werden die beiden Fuzzy-Sets für den Schmelzparameter und den Gefrierparameter aufgestellt. Hat der Schmelzparameter, wie im Beispiel, den Wert $0.4\text{ km}^\circ\text{C}$ so wird der Fuzzy-Klasse „zu klein“ der Wert 0.6 zugewiesen. Die Zugehörigkeit zur Fuzzy-Klasse „passend“ beträgt 0.4. Der Gefrierparameter im Beispiel hat den Wert $-3.5\text{ km}^\circ\text{C}$. Das führt zu einer Zugehörigkeit zur Fuzzy-Klasse „zu klein“ mit dem Wert 0.25, zur Fuzzy-Klasse „passend“ mit dem Wert 0.75 und zur Fuzzy-Klasse „zu groß“ mit dem Wert 0. In Tabelle IV.2 werden also die Bedingungsgleichungen in der ersten, der dritten, der vierten und der sechsten Zeile berücksichtigt. Die Ausgangs-Fuzzy-Klassen werden mit folgenden Werten belegt:

$$FZ\ gering = \min[zu\ klein(\beta_m), zu\ klein(\beta_f)] = \min[0.6, 0.25] = 0.25$$

$$FZ\ neutral = \min[zu\ klein(\beta_m), passend(\beta_f)] = \min[0.6, 0.75] = 0.6$$

$$FZ\ neutral = \min[passend(\beta_m), zu\ klein(\beta_f)] = \min[0.4, 0.25] = 0.25$$

$$FZ\ sehr\ hoch = \min[passend(\beta_m), passend(\beta_f)] = \min[0.4, 0.75] = 0.4$$

Für die Ausgangs-Klasse „neutral“ existieren in diesem Beispiel zwei Einträge, aus denen nun das Maximum ausgewählt wird. Die Fuzzy-Variable „FZ neutral“ wird mit dem Wert $\max[0.6, 0.25] = 0.6$ belegt. In anderen Szenarien oder mit anderen Beispielswerten kann die Anzahl der Einträge auch deutlich höher sein. Das Prinzip bleibt dasselbe. Der Wert, der in die Defuzzifizierung eingeht, ist der

Schmelzparameter	Temperatur an der Wolkenobergrenze	Relative Feuchte
passend	passend	passend
zu groß	zu groß	zu groß

Tabelle IV.5.: *Linguistische Variablen, die eine Zugehörigkeitsklasse beschreiben, im Szenario „Schnee/Regen“.*

maximale Eintrag dieses Zugehörigkeitsvektors. Mithilfe der Flächenschwerpunkt-Methode werden die Fuzzy-Klassen zu einem aussagekräftigen Wert umgewandelt. Grafisch veranschaulicht bedeutet das, dass die Dreiecke des Ausgangs-Fuzzy-Sets bei diesem Zugehörigkeitswert abgeschnitten werden. So erhält man für mehrere Indikator-Klassen unterschiedlich hohe Trapezoide. In der Flächenschwerpunkt-Methode werden diese Trapezoide als zusammenhängende Fläche betrachtet und deren Schwerpunkt ermittelt. Die x-Koordinate des Schwerpunktes markiert den finalen Ausgabewert der Defuzzifizierung.

Schnee/Regen Wie Kapitel IV.3.3.1 gezeigt hat sind im Szenario „Schnee/Regen“ der Schmelzparameter, die Temperatur an der Wolkenobergrenze und die relative Feuchte die entscheidenden Größen. Wie bei den anderen Szenarien auch, wird an jedem Gitterpunkt und in jeder Höhenschicht aus diesen Eingangsparametern über Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung ein Indikator berechnet. In Tabelle IV.5 sind die zu berücksichtigenden Klassen der entscheidenden Parameter gelistet. Ist der Schmelzparameter in der untersuchten Modellschicht zu groß, sinkt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von festem Niederschlag. Es muss in dieser Höhe eher mit flüssigem Niederschlag gerechnet werden. Die Temperatur an der Wolkenobergrenze ist ein eindeutiges Anzeichen, ob eine Wolke vereist ist oder ob Flüssigwasser innerhalb der Wolke dominiert. Bis zu einem Temperaturbereich von -12°C bis -20°C tritt unterkühltes Flüssigwasser in der Wolke häufig auf. Bei kälteren Temperaturen ist eher mit Eispartikeln und Schnee zu rechnen, während bei wärmeren Temperaturen oft flüssiger Niederschlag in Form von Regen oder Niesel beobachtet werden kann. Als dritter Faktor spielt auch die relative Feuchte eine Rolle. Je größer sie ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Niederschlag in flüssiger Form auftritt.

Auch für dieses Szenario wurden Häufigkeitsverteilungen erstellt, die die theoretischen Überlegungen stützen sollen. Abbildung IV.21 zeigt die Häufigkeitsverteilungen und die Fuzzy-Set-Funktionen für die entscheidenden Parameter dieses Szenarios. Analog zur Vorgehensweise im Szenario „Warme Nase“ müssen für das Szenario „Schnee/Regen“ $2 * 2 * 2 = 8$ Bedingungsgleichungen aufgestellt werden, um aus den fuzzifizierten Eingangsgrößen einen aussagekräftigen Indikator zu berechnen. Die Inferenz und die Defuzzifizierung werden ebenfalls nach der im

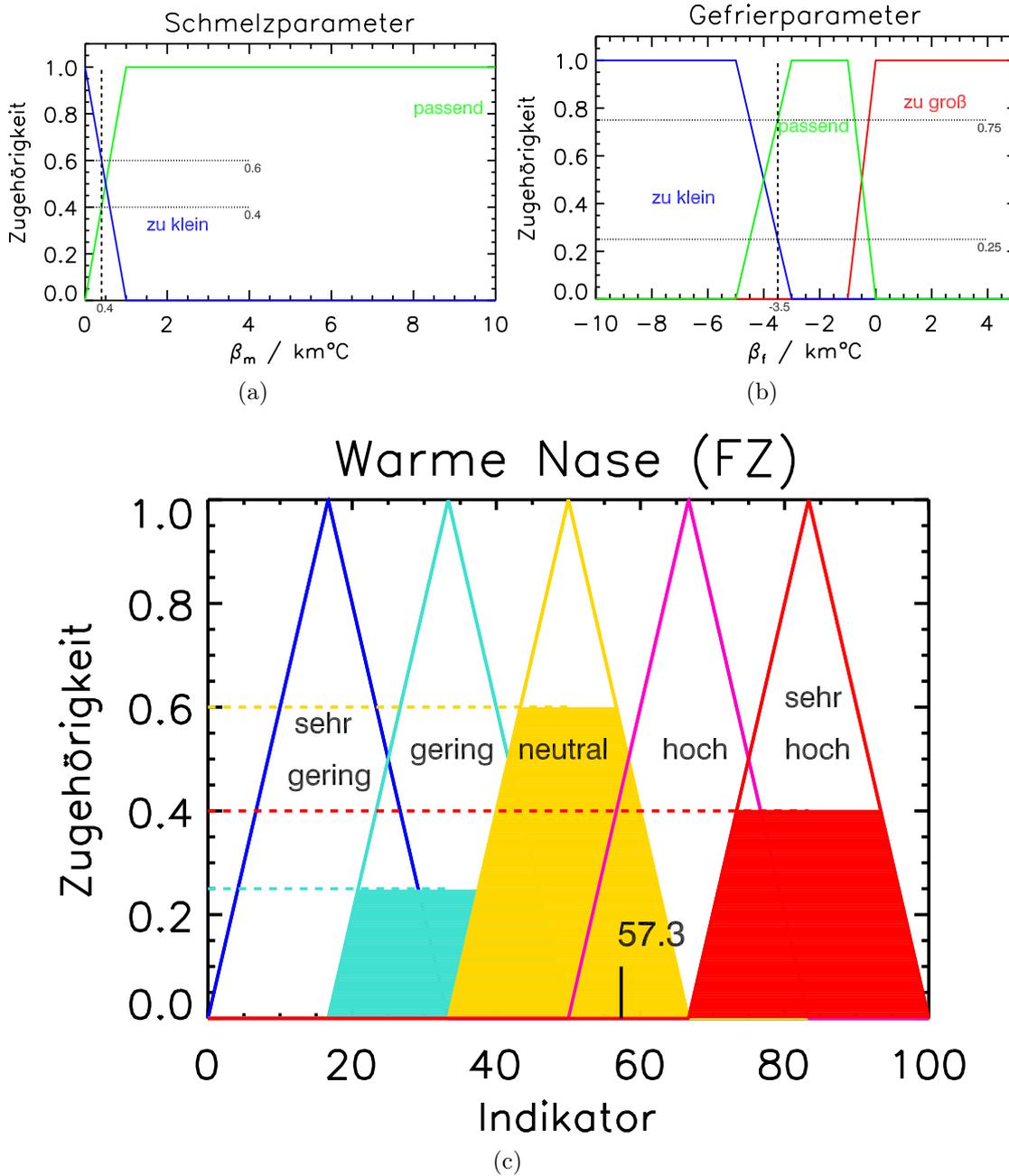


Abbildung IV.20.: Beispiel zur Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung im Unterszenarios „gefrierender Regen“ im Szenario „Warme Nase“. Abbildung (a) und (b) zeigen Fuzzy-Sets für Gefrier- und Schmelzparameter mit Beispielwerten. (c) zeigt Ausgangs-Fuzzy-Sets für dieses Unterszenario. Aus den Trapezoide der Fuzzy-Klassen „gering“, „neutral“ und „sehr hoch“ wird durch Inferenz und Defuzzifizierung ein Indikator mit Wert 57.3 ermittelt. Dies ist der defuzzifizierte Wert. Eine detaillierte Beschreibung dieses Beispiels ist im Text zu finden.

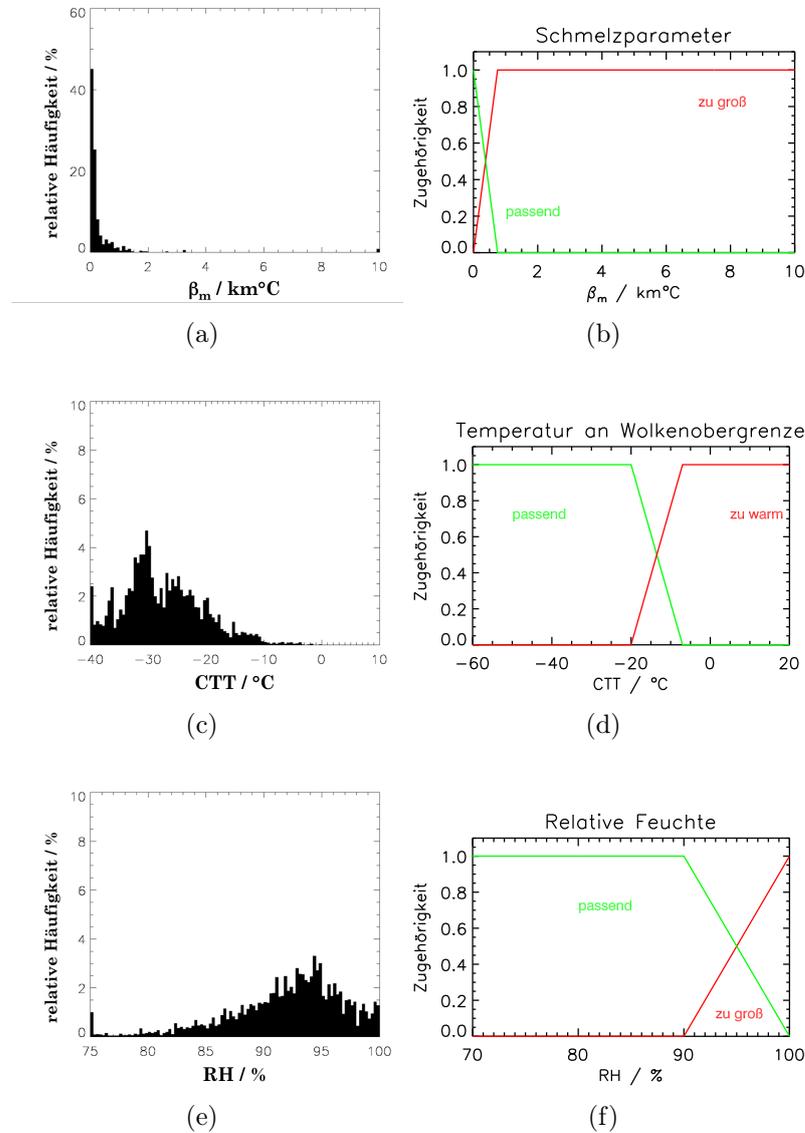


Abbildung IV.21.: Häufigkeitsverteilungen und Fuzzy-Set-Funktionen für das Szenario „Schnee/Regen“. (a), (c) und (e) zeigen die Häufigkeitsverteilungen des Schmelzparameters (β_m), der Temperatur an der Wolkenobergrenze (CTT) und der relativen Feuchte (RH). (b), (d) und (f) zeigen die dazugehörigen Fuzzy-Set-Funktionen.

WENN $zu\ groß(\beta_m) > 0$ UND $zu\ warm(CTT) > 0$ UND $zu\ groß(RH) > 0$ DANN $SN\ sehr\ gering$
WENN $zu\ groß(\beta_m) > 0$ UND $zu\ warm(CTT) > 0$ UND $passend(RH) > 0$ DANN $SN\ sehr\ gering$
WENN $zu\ groß(\beta_m) > 0$ UND $passend(CTT) > 0$ UND $zu\ groß(RH) > 0$ DANN $SN\ sehr\ gering$
WENN $zu\ groß(\beta_m) > 0$ UND $passend(CTT) > 0$ UND $passend(RH) > 0$ DANN $SN\ gering$
WENN $passend(\beta_m) > 0$ UND $zu\ warm(CTT) > 0$ UND $zu\ groß(RH) > 0$ DANN $SN\ neutral$
WENN $passend(\beta_m) > 0$ UND $zu\ warm(CTT) > 0$ UND $passend(RH) > 0$ DANN $SN\ neutral$
WENN $passend(\beta_m) > 0$ UND $passend(CTT) > 0$ UND $zu\ groß(RH) > 0$ DANN $SN\ hoch$
WENN $passend(\beta_m) > 0$ UND $passend(CTT) > 0$ UND $passend(RH) > 0$ DANN $SN\ sehr\ hoch$

Tabelle IV.6.: *Bedingungsgleichungen des Szenarios „Schnee/Regen“.*

vorangehenden Kapitel detailliert beschriebenen Methodik durchgeführt. Tabelle IV.6 listet die Bedingungsgleichungen dieses Szenarios auf. Darin ist zu erkennen, dass der relativen Feuchte eine leicht untergeordnete Bedeutung im Vergleich zu Schmelzparameter und der Temperatur an der Wolkenobergrenze zugewiesen wird. So wird beispielsweise der Kombinationsmöglichkeit, bei der die relative Feuchte einen Anteil im Fuzzy-Set „passend“ besitzt, aber Schmelzparameter und Temperatur an der Wolkenobergrenze Anteile in den Bereichen „zu groß“ bzw. „zu warm“ haben, der Ausgangs-Klasse „SN sehr gering“ zugewiesen. Oder besitzen Schmelzparameter und Temperatur an der Wolkenobergrenze Anteile im Fuzzy-Set „passend“ und die relative Feuchte einen Anteil im Bereich „zu groß“, so wird diese Kombination dennoch der Ausgangsklasse „SN hoch“ zugerechnet.

Nach der Berechnung des Indikators für Schnee wird innerhalb des Szenarios „Schnee/Regen“ ein Unterszenario „gefrierender Niesel“ eingeführt. Ist der Schneekindikator an einem Gitterpunkt sehr gering ($SN\ Indikator < GW_{mix}$), wird dort von flüssigem Niederschlag ausgegangen. Hat die Temperatur dort gleichzeitig einen negativen Wert, besteht die Gefahr, dass dieser flüssige Niederschlag unterkühlt und bei Kontakt mit einem Kollisionspartner zu Eis gefriert. An einem solchen Gitterpunkt wird der Standardwert 0 des Informationsfeldes für gefrierenden Niesel durch den Wert 1 ersetzt. In der späteren Klassifikation (siehe Kapitel IV.3.3.3)

Radar-reflektivität	Temperatur	Relative Feuchte
	zu kalt	zu klein
passend	passend	passend
zu groß	zu warm	

Tabelle IV.7.: *Linguistische Variablen, die eine Zugehörigkeitsklasse beschreiben, im Szenario „Vereisung in Wolken (SLD)“.*

werden solche Gitterpunkte in der Klasse *gefrierender Niederschlag* berücksichtigt.

Vereisung in Wolken (SLD) Die entscheidenden Parameter dieses WHITE-Szenarios sind die Reflektivität des Precipitation-Scans sowie die Temperatur und die relative Feuchte in den Luftschichten unterhalb einer klar definierten stratiformen Wolkenobergrenze (vgl. IV.3.3.1). Im Gegensatz zu den Szenarien „Warme Nase“ und „Schnee/Regen“ ist die Radarreflektivität in diesem Szenario ein entscheidender Parameter, da Vereisung nur in Zusammenhang mit schwachen Reflektivitäten beobachtet werden kann. Die beiden anderen Szenarien können bei unterschiedlichsten Reflektivitätswerten auftreten. Die Reflektivität kennzeichnet dort jeweils nur die Niederschlagsintensität. Tabelle IV.7 zeigt die benötigten Fuzzy-Klassen der eingehenden Parameter.

Das Szenario wird immer berechnet, wenn in den Profilen eine klar definierte stratiforme Wolkenobergrenze gefunden wird. Ist der Niederschlag, der über die gemessene Reflektivität des Precipitation-Scans definiert ist, an diesem Gitterpunkt zu stark, so wird von niederschlagsbildenden Prozessen ausgegangen, die der Existenz von unterkühlten Wassertröpfchen widersprechen. Bei zu kalten Temperaturen in den Luftschichten unterhalb der Wolkenobergrenze wird ein dominantes Vorkommen an Eispartikeln angenommen, während bei zu warmen Temperaturen die Gefahr der Unterkühlung abnimmt. Ein relativ schmaler Bereich beinhaltet die Temperaturen, bei denen bevorzugt unterkühltes Flüssigwasser auftreten kann. Die relative Feuchte wird in diesem Szenario als dritte ergänzende Informationsquelle hinzugezogen. Bei stark ungesättigter Luft wird ein geringer Wassergehalt in der Atmosphäre unterstellt und die Vereisungsgefahr ist gering. In Tabelle IV.8 sind die $2 * 3 * 2 = 12$ Bedingungsgleichungen des Szenarios „Vereisung in Wolken (SLD)“ aufgelistet. Analog zur Vorgehensweise in den vorangehenden Kapiteln wird aus diesen fuzzifizierten Eingangsgrößen über Inferenz und Defuzzifizierung ein aussagekräftiger Parameter berechnet. Da Vereisung nicht direkt mit einem am Boden beobachtbaren Wetterphänomen in Verbindung gebracht werden kann, konnten für dieses Szenario keine Häufigkeitsverteilungen erstellt werden. Es wird an dieser Stelle auf die zugrundeliegenden theoretischen Überlegungen vertraut, die beispielsweise auf die Arbeiten von Thompson u. a. (1997) oder Bernstein u. a.

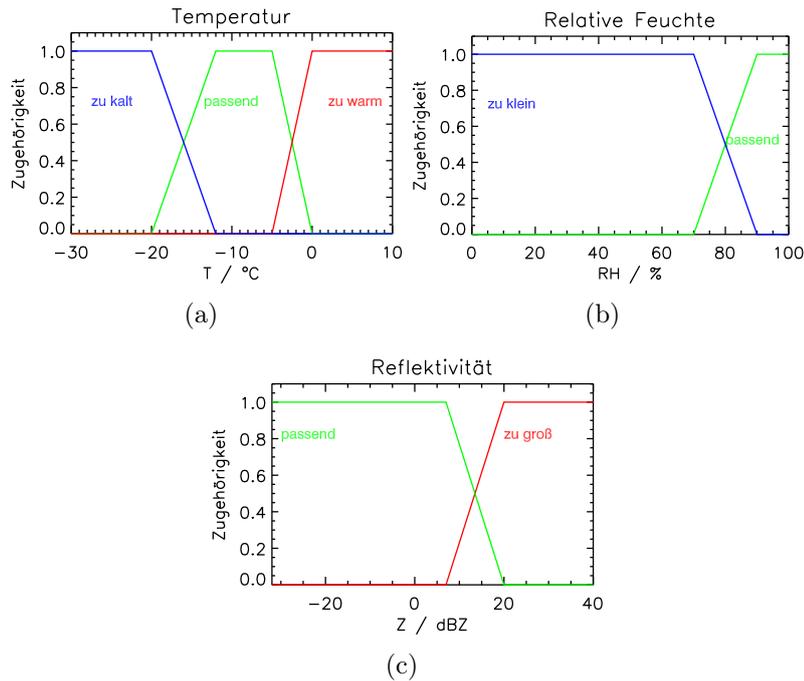


Abbildung IV.22.: Fuzzy-Set-Funktionen für das Szenario „Vereisung in Wolken (SLD)“. (a) und (b) zeigen die Fuzzy-Set-Funktionen für die Temperatur (T) bzw. die relative Feuchte (RH) in den Luftschichten unterhalb einer klar definierten stratiformen Wolkenobergrenze. (c) zeigt die Fuzzy-Set-Funktionen für die Reflektivität des Precipitation-Scans (Z).

(2005) zurückgehen. Die Fuzzy-Sets der Eingangsparameter sind in der Abbildung IV.22 zu sehen.

Verdunstung Bei schwachen Niederschlagsintensitäten können fallende Niederschlagsteilchen in einer eingelagerten trockenen Luftschicht in die Gasphase übergehen. Als entscheidende Parameter für dieses Szenario werden die Reflektivität des Precipitation-Scans und die vertikale Ausdehnung der trockenen Luftschicht berücksichtigt. Je geringer die Reflektivität und je mächtiger die trockene Schicht, desto wahrscheinlicher kann der Verdunstungsprozess beobachtet werden. Abbildung IV.23 zeigt die Fuzzy-Sets der beiden Parameter, Tabelle IV.9 die dazugehörigen $2 * 2 = 4$ Bedingungsgleichungen.

Durch das Szenario „Verdunstung“ wird die Untergrenze einer eventuell vorhandenen trockenen Schicht ermittelt. Ist der Indikator für Verdunstung hoch, wird angenommen, dass Niederschlag innerhalb der trockenen Schicht verdunstet. Die im Anschluss folgende Klassifikation (siehe Kapitel IV.3.3.3) wird dann nur in den Modellschichten zwischen der Untergrenze der trockenen Schicht und der Wolkenobergrenze durchgeführt.

WENN $zu\ kalt(T) > 0$ UND $zu\ klein(RH) > 0$ UND $passend(Z) > 0$
DANN *STI sehr gering*

WENN $zu\ kalt(T) > 0$ UND $zu\ klein(RH) > 0$ UND $zu\ groß(Z) > 0$
DANN *STI sehr gering*

WENN $zu\ kalt(T) > 0$ UND $passend(RH) > 0$ UND $passend(Z) > 0$
DANN *STI neutral*

WENN $zu\ kalt(T) > 0$ UND $passend(RH) > 0$ UND $zu\ groß(Z) > 0$
DANN *STI sehr gering*

WENN $passend(T) > 0$ UND $zu\ klein(RH) > 0$ UND $passend(Z) > 0$
DANN *STI hoch*

WENN $passend(T) > 0$ UND $zu\ klein(RH) > 0$ UND $zu\ groß(Z) > 0$
DANN *STI neutral*

WENN $passend(T) > 0$ UND $passend(RH) > 0$ UND $passend(Z) > 0$
DANN *STI sehr hoch*

WENN $passend(T) > 0$ UND $passend(RH) > 0$ UND $zu\ groß(Z) > 0$
DANN *STI hoch*

WENN $zu\ warm(T) > 0$ UND $zu\ klein(RH) > 0$ UND $passend(Z) > 0$
DANN *STI sehr gering*

WENN $zu\ warm(T) > 0$ UND $zu\ klein(RH) > 0$ UND $zu\ groß(Z) > 0$
DANN *STI sehr gering*

WENN $zu\ warm(T) > 0$ UND $passend(RH) > 0$ UND $passend(Z) > 0$
DANN *STI gering*

WENN $zu\ warm(T) > 0$ UND $passend(RH) > 0$ UND $zu\ groß(Z) > 0$
DANN *STI sehr gering*

Tabelle IV.8.: *Bedingungsgleichungen des Szenarios „Vereisung in Wolken (SLD)“.*

WENN $zu\ klein(dh) > 0$ UND $zu\ groß(Z) > 0$ DANN *VERD sehr gering*

WENN $zu\ klein(dh) > 0$ UND $passend(Z) > 0$ DANN *VERD gering*

WENN $passend(dh) > 0$ UND $zu\ groß(Z) > 0$ DANN *VERD hoch*

WENN $passend(dh) > 0$ UND $passend(Z) > 0$ DANN *VERD sehr hoch*

Tabelle IV.9.: *Bedingungsgleichungen des Szenarios „Verdunstung“.*

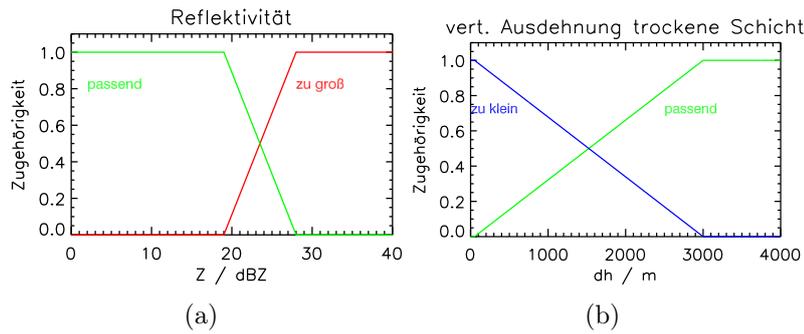


Abbildung IV.23.: Fuzzy-Set-Funktionen für das Szenario „Verdunstung“. (a) zeigt die Fuzzy-Set-Funktionen für die Reflektivität des Precipitation-Scans (Z) und (b) die Fuzzy-Set-Funktionen für die vertikale Ausdehnung der trockenen Luftschicht (dh).

Boden-temperatur	Radar-reflektivität	Indikator für Schnee
	zu klein	zu klein
passend	passend	passend
zu warm		

Tabelle IV.10.: Linguistische Variablen, die eine Zugehörigkeitsklasse beschreiben, im Unterszenario „Neuschnee“.

Boden In vielen Fällen ist die wichtigste Information für die Entscheidungsträger an Flughäfen die Kenntnis über die zu erwartenden Verhältnisse am Boden. In WHITE werden sowohl Neuschneeakkumulation als auch Glatteisgefahr berücksichtigt.

Für das Unterszenario „Neuschnee“ werden die Bodentemperatur, die Reflektivität des Precipitation-Scans und der Indikator des Szenarios „Schnee/Regen“ der untersten Modellschicht als entscheidende Parameter identifiziert. Tabelle IV.10 zeigt die zu berücksichtigenden Möglichkeiten, die anhand der Fuzzy-Sets in Abbildung IV.24 kombiniert werden. Wenn der Indikator des Szenarios „Schnee/Regen“ groß ist, so muss am entsprechenden Gitterpunkt mit Schneefall gerechnet werden. Bei gleichzeitig negativer Bodentemperatur und starkem Niederschlag ist die Gefahr der Neuschneeakkumulation am Boden vorhanden. Ist der Boden dagegen verhältnismäßig warm oder die Intensität des Niederschlags gering, nimmt auch die Wahrscheinlichkeit ab, dass sich am Boden eine Neuschneedecke bildet. Gleiches gilt, wenn der Indikator für Schnee eher auf Mischniederschlag oder gar auf Regen schließen lässt. In diesem Unterszenario werden $2 * 2 * 2 = 8$ Bedingungsgleichungen aufgestellt, welche in der Tabelle IV.11 verzeichnet sind.

Das Unterszenario „Glatteis“ kommt ohne Anwendung von Fuzzy-Logik aus. Ein hoher Indikator für gefrierenden Regen des Szenarios „Warme Nase“ in der unters-

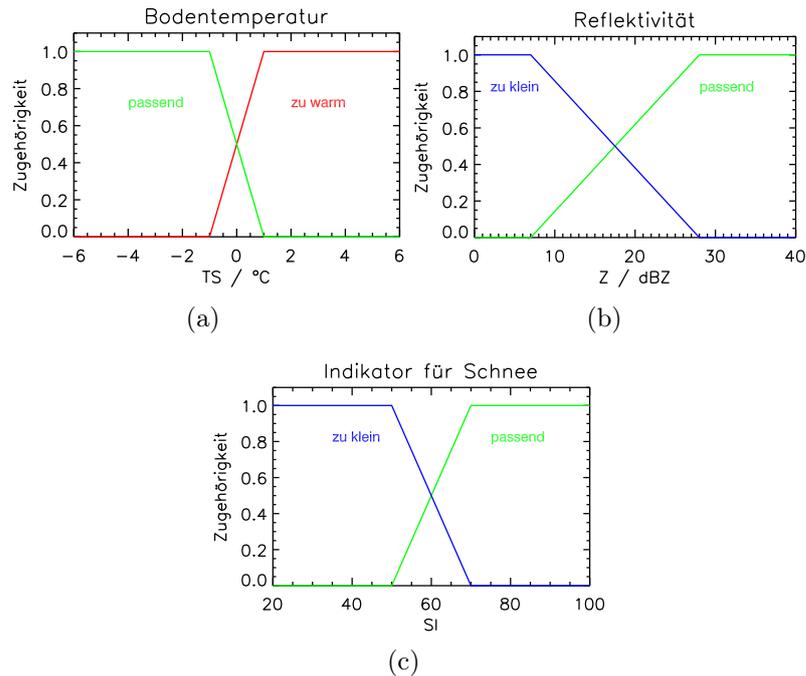


Abbildung IV.24.: Fuzzy-SetFunktionen für das Unterszenario „Neuschnee“. (a) zeigt die Fuzzy-Set-Funktionen für die Bodentemperatur (TS), (b) die Fuzzy-Set-Funktionen für die Reflektivität des Precipitation-Scans (Z) und (c) die Fuzzy-Set-Funktionen für den Indikator des Szenarios „Schnee/Regen“ der untersten Modellschicht (SI).

ten Modellschicht (FZ Indikator $> GW_{fz}$) führt bei einer gleichzeitigen Reflektivität von mehr als 1 dBZ und kalter Bodentemperatur ($TS < 1\text{ °C}$) zu einer Identifikation von Glatteisgefahr am entsprechenden Gitterpunkt. Unterkühlte Tropfen gefrieren innerhalb kürzester Zeit nach dem Aufprall am Boden. Der Boden oder andere Oberflächen, wie zum Beispiel Autos oder Flugzeuge, funktionieren dabei als Gefrierpartner der unterkühlten Tropfen. Ähnliches gilt, wenn der Indikator für Schnee des Szenarios „Schnee/Regen“ (FZ Indikator $< GW_{mix}$) und der Indikator für Eisregen des Szenarios „Warme Nase“ (IP Indikator $< GW_{ip}$) gering sind und deswegen mit flüssigem Niederschlag gerechnet werden muss. Bei unterkühlten Bodentemperaturen ($TS < 0\text{ °C}$) wird dieser flüssige Niederschlag am Boden gefrieren und eine Eisschicht bilden. Im Informationsfeld des Szenarios „Boden“ wird einem Gitterpunkt, an dem auf diese Weise Glatteisgefahr erkannt wird, der Wert 111 zugewiesen. Die restlichen Gitterpunkte dieses zweidimensionalen Bodenfeldes erhalten den im Unterszenario „Neuschnee“ berechneten Indikator (NA Indikator) zugeteilt.

WENN $zu\ klein(SI) > 0$ UND $zu\ warm(TS) > 0$ UND $zu\ klein(Z) > 0$ DANN NA <i>sehr gering</i>
WENN $zu\ klein(SI) > 0$ UND $zu\ warm(TS) > 0$ UND $passend(Z) > 0$ DANN NA <i>sehr gering</i>
WENN $zu\ klein(SI) > 0$ UND $passend(TS) > 0$ UND $zu\ klein(Z) > 0$ DANN NA <i>sehr gering</i>
WENN $zu\ klein(SI) > 0$ UND $passend(TS) > 0$ UND $passend(Z) > 0$ DANN NA <i>gering</i>
WENN $passend(SI) > 0$ UND $zu\ warm(TS) > 0$ UND $zu\ klein(Z) > 0$ DANN NA <i>sehr gering</i>
WENN $passend(SI) > 0$ UND $zu\ warm(TS) > 0$ UND $passend(Z) > 0$ DANN NA <i>gering</i>
WENN $passend(SI) > 0$ UND $passend(TS) > 0$ UND $zu\ klein(Z) > 0$ DANN NA <i>gering</i>
WENN $passend(SI) > 0$ UND $passend(TS) > 0$ UND $passend(Z) > 0$ DANN NA <i>sehr hoch</i>

Tabelle IV.11.: *Bedingungsgleichungen des Unterszenarios „Neuschnee“.*

IV.3.3.3. Klassifikation der Szenarien

Die Anwendung der Fuzzy-Logik in Form von Fuzzy-Sets, Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung resultiert in aussagekräftigen Größen, die in dieser Arbeit als Fuzzy-Indikatoren bezeichnet werden. Für jeden Gitterpunkt im Untersuchungsgebiet sind voneinander unabhängige Indikatoren für jedes Szenario vorhanden. Aus dem Wert der Indikatoren lässt sich abschätzen, wie stark mit einer bestimmten Winterwettersituation zu rechnen ist. Zusätzlich existieren Indikatoren für die Vereisung in Wolken mit SLD, die Verdunstung in einer trockenen Luftschicht und für die Neuschneeakkumulation oder Glatteisbildung am Boden. Zusammen mit dem Reflektivitätsfeld des Precipitation-Scans und der Information über die Höhe der Wolkenobergrenze sind insgesamt zehn Informationsklassen vorhanden. Diese Klassen werden in WHITE durch einen hierarchischen Klassifikationsalgorithmus in eindeutige semantische Begriffe transformiert, um beispielsweise den Entscheidungsträgern am Flughafen kritische Informationen präzise und plausibel strukturiert liefern zu können. Die Motivation dahinter ist, dass die Entscheidungsträger in der Regel keine Kapazitäten haben, um sich mit interpretierbaren, inhomogenen Resultaten zu beschäftigen. Durch die Klassifikation wird jedem Gitterpunkt eindeutig ein Winterwetterszenario zugeordnet. So können an jeder Gitterpunktsäule

vertikale Wetterobjekte erstellt werden, die eine Beurteilung der atmosphärischen Situation ermöglichen. Im WHITE-Modul 4 (beschrieben in Kapitel IV.3.4) werden zudem benachbarte Gitterpunkte gleicher Klassifikation in jeder Modellschicht zu horizontalen Strukturen zusammengefasst. Diese Strukturen werden in der Folge als horizontale Winterwetterobjekte bezeichnet.

Das Klassifikationsverfahren wird illustriert durch die Baumstruktur in Abbildung IV.25. Es wird durchgeführt für alle Gitterpunkte, die unterhalb der aus den Temperatur- und Feuchteprofilen ermittelten Wolkenobergrenze liegen. Zusätzlich wird durch das Szenario „Verdunstung“ das Verhalten der Niederschlags Elemente in einer potentiell vorhandenen trockenen Schicht bewertet. Wie schon in Kapitel IV.3.3.2 erwähnt, wird Verdunstung angenommen, wenn der Indikator für Verdunstung groß ist ($VERD \text{ Indikator} > GW_{verd}$). Die Klassifikation wird dann nur in den Modellschichten zwischen der Untergrenze der trockenen Schicht und der Wolkenobergrenze durchgeführt. In den Szenarien „Schnee/Regen“ und „Boden“ sowie bei der Beurteilung der Verdunstung, wurden bereits die Grenzwerte GW_{fz} , GW_{ip} und GW_{mix} für die Indikatoren verwendet. Auch für die restlichen Szenarien werden für die Klassifikation die entsprechenden Grenzwerte GW_{sn} , GW_{sld} , GW_{mp} und GW_{na} eingeführt. In der quasioperationellen Testversion wurde innerhalb der hierarchischen Klassifikationsstruktur für GW_{mix} der Wert 50 sowie für GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{sn} , GW_{sld} , GW_{mp} und GW_{na} der Wert 66.66 verwendet. Der Wert 50 markiert den Mittelwert der Indikatorkala. Beträgt der Wert eines berechneten Indikators mehr als 50, so muss prinzipiell eher mit dem jeweiligen Ereignis gerechnet werden, als dass es abgelehnt werden kann. Per Definition ist in WHITE der maximale Wert der Indikatoren 83.33. Dieser Wert markiert den Schwerpunkt der Dreiecksfunktion „sehr hoch“ in den Ausgangs-Fuzzy-Sets (vgl. Abbildung IV.20). Sprechen also alle berücksichtigten Eingangsparameter vollständig für das Eintreffen des Szenarios, wird der Indikator den Wert 83.33 besitzen. 66.66 markiert den Mittelwert zwischen dem Maximalwert und 50. Beträgt der Wert eines Indikators mehr als 66.66, wird angenommen, dass das Ereignis mit relativ hoher Sicherheit stattfinden wird. Im Zuge der DLR-Winterwetterkampagnen wurden für unterschiedliche Grenzwerte statistische Verifikationen mit dem Ziel durchgeführt, die Klassifikation zu optimieren (vgl. Kapitel IV.5.2.2). Die hohe Rate an Fehlmeldungen bei zu kleinen Indikatorgrenzwerten sollte minimiert werden. Gleichzeitig sollten möglichst viele Ereignisse korrekt detektiert und vorhergesagt werden. Generell gehen durch die Einführung der Grenzwerte und der hierarchischen Klassifikation viele Informationen, die nach der Anwendung der Fuzzy-Logik vorhanden sind, wieder verloren. Zukünftige Weiterentwicklungen könnten deswegen an dieser Stelle einen Ansatzpunkt finden. In der aktuellen Version von WHITE, die im Rahmen dieser Arbeit beschrieben wird, legt man zugrunde, dass durch eine eindeutige Klassifikation das System eher von potentiellen Kunden akzeptiert und genutzt wird. Vor allem im Hinblick auf das in Kapitel IV.4 beschriebene Participatory-Sensing-Konzept von WHITE überwiegt daher der Nutzen, der sich aus der Klassifikation und dem damit verbundenen Informationsverlust ergibt.

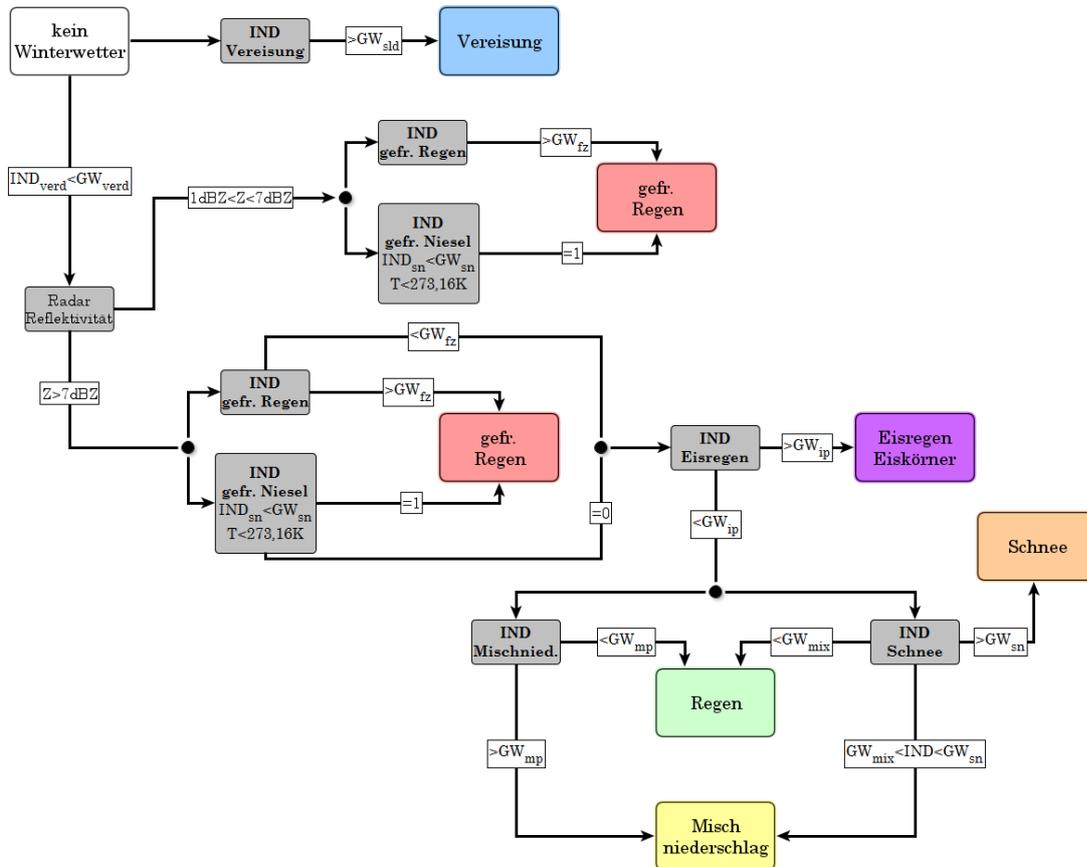


Abbildung IV.25.: Baumstruktur der Klassifikation in WHITE. Eine detaillierte Beschreibung ist im Text zu finden.

Als Ausgangslage für den Klassifikationsalgorithmus wird jedem Gitterpunkt die Klasse *kein Winterwetter* zugeordnet. Als ersten Schritt überprüft der Klassifikationsalgorithmus das Indikatorfeld des Szenarios „Vereisung in Wolken (SLD)“ (IND Vereisung). Übertrifft dieser Indikator an einem Gitterpunkt den Grenzwert GW_{slid} so wird dort die Klasse *kein Winterwetter* durch die Klasse *Vereisung* überschrieben. An Gitterpunkten, an denen im Reflektivitätsfeld des Precipitation-Scans Niederschlag erkannt wird, wird anschließend die weitere Struktur des Algorithmus durchlaufen.

Bei schwachen Reflektivitäten ($1 \text{ dBZ} < Z < 7 \text{ dBZ}$) wird dem Gitterpunkt die Klasse *gefrierender Regen* zugeordnet, falls der Indikator für gefrierenden Regen (IND gefr. Regen) größer als GW_{fz} ist oder der Indikator für gefrierenden Niesel (IND gefr. Niesel) im Szenario „Schnee/Regen“ den Wert 1 erhalten hat. Indikatorfelder der anderen Szenarien werden bei diesen schwachen Reflektivitäten und den damit verbundenen minimalen Niederschlagsraten nicht berücksichtigt. Gitterpunkte, die im ersten Klassifikationsschritt bereits der Klasse *Vereisung* zugeteilt worden sind,

können durch die neue Zuordnung korrigiert werden, da gefrierender Niederschlag als potentiell gefährlicher für den Luftverkehr eingestuft wird als die Vereisung in stratiformen Wolken. Im Szenario „Vereisung in Wolken (SLD)“ ist die Radarreflektivität ein Teil des Fuzzifizierungsprozesses. Bei höheren Reflektivitäten ist die Vereisung deswegen in der Regel ausgeschlossen. Ist dennoch ein Gitterpunkt mit starkem Niederschlag nach dem ersten Schritt mit der Klasse *Vereisung* verknüpft, besteht die Möglichkeit diese Klassifikation im weiteren Verlauf anhand der potentiell problematischeren Niederschlagsszenarien zu korrigieren.

Für Reflektivitäten größer als 7 dBZ enthält der Klassifikationsalgorithmus einen dritten Hauptzweig. Darin können die Indikatoren für gefrierenden Regen bzw. für gefrierenden Niesel zu der Klassifikation *gefrierender Regen* führen. Sprechen beide Indikatoren gegen das Auftreten von gefrierendem Niederschlag, so folgt eine Überprüfung des Unterszenarios „Eisregen/Eiskörner“ des Szenarios „Warme Nase“ (IND Eisregen). Übertrifft dessen Indikator den Wert von GW_{ip} , so erhält der Gitterpunkt die Klassifikation *Eisregen/Eiskörner*. Deutet der Indikator hingegen nicht eindeutig auf dieses Wetterszenario hin, werden die Indikatoren des Szenarios „Schnee/Regen“ (IND Schnee) und des Unterszenarios „Mischniederschlag“ des Szenarios „Warme Nase“ (IND Mischnied.) in die Klassifikation einbezogen. Falls $IND\ Schnee > GW_{sn}$, wird der Gitterpunkt als *Schnee* klassifiziert. Bei $GW_{mix} < IND\ Schnee < GW_{sn}$ oder $IND\ Mischnied. > GW_{mp}$ wird der Gitterpunkt der Klasse *Mischniederschlag* zugeteilt. Bei kleineren Werten dieser beiden Indikatoren werden sämtliche Winterwetterszenarien abgelehnt und der Gitterpunkt wird als *Regen* klassifiziert.

IV.3.4. Modul 4: Zusammenfassung zu Objekten durch Bilddatenverarbeitung

In der Abteilung Verkehrsmeteorologie des Instituts für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt hat es sich bewährt, die Ergebnisse von Nowcasting-Systemen in Form von Wetterobjekten auszugeben. Das hat den Vorteil, dass komplexe Wetterinformationen auf eine geringe Datenmenge reduziert werden, die anschaulich dargestellt und von den Nutzern des Systems einfach und schnell erfasst werden können. Es existieren beispielsweise Systeme, die Gewitterobjekte detektieren (vgl. Zinner u. a. (2008) und Kober & Tafferner (2009)) und mittlerweile auf dem kommerziellen Markt angeboten werden (Tafferner & Forster, 2013). In WHITE wird dieser Ansatz aufgegriffen und in jeder Modellschicht benachbarte Gitterpunkte gleicher Klassifikation zu Objekten zusammengefasst. Für jede der Klassen können so in jeder Modellschicht horizontale Polygone gebildet werden, die eine flächendeckende Beurteilung der Winterwettersituation im Untersuchungsgebiet ermöglichen. In einer anschließenden grafischen Darstellung können dann alle mit Niederschlag verbundenen Objekte zu einem Winterniederschlagsobjekt kombiniert werden. Die Arbeitsschritte dieser Objektbildung umfassen die

Szenario	Entscheidende Fuzzy-Parameter	Zusätzliche Parameter	Mögliche Winterwetterklassen
Warme Nase	Schmelzparameter	Radarreflektivität	Gefrierender Regen Eisregen/Eiskörner Mischniederschlag
	Gefrierparameter	Wolkenobergrenze	
Schnee/Regen	Temperatur an Wolkenobergrenze	Radarreflektivität	Schnee Mischniederschlag
	Relative Feuchte	Wolkenobergrenze(n)	
	Schmelzparameter		
Wolkenvereisung (SLD)	Temperatur	Stratiforme Wolkenobergrenze(n)	Vereisung
	Radarreflektivität		
	Relative Feuchte		
Verdunstung	Ausdehnung trockene Schicht	Wolkenuntergrenze	
	Radarreflektivität		
Boden	Bodentemperatur	Indikatoren Szenario Warme Nase	Neuschnee Glatteis
	Radarreflektivität		
	Indikator Szenario Schnee/Regen		

Tabelle IV.12.: Szenarien, Parameter und Winterwetterklassen in WHITE

Anwendung eines Weichzeichnungsfilters sowie morphologische bildverarbeitende Maßnahmen. Dadurch lassen sich die polygonalen Konturen der Objekte glätten, selektiv einzelne kleine Störstrukturen entfernen, kleine Klassifikationslöcher innerhalb der Objekte schließen und nahe beieinander liegende Objekte zu einem großen Objekt verschmelzen. In WHITE wird die Zusammenfassung zu Objekten, wie auch die Anwendung der Fuzzy-Logik, für jeden verfügbaren Zeitschritt separat und unabhängig voneinander durchgeführt.

In einem ersten Schritt wird jede Klasse separat als binäres Bild betrachtet. Die der jeweiligen Winterwetterklasse zugewiesenen Gitterpunkte erhalten dabei den Wert 1. Die restlichen Pixel werden mit dem Wert 0 belegt. Im ebenso für die Bodenschicht durchgeführten Verfahren erhalten Gitterpunkte, an denen der Indikator des Unterszenarios „Neuschnee“ im Szenario „Boden“ einen Wert größer als GW_{na} besitzt, den Wert 1 und werden dadurch als Neuschnee klassifiziert. Gitterpunkte, denen durch das Unterszenario „Glatteis“ der Wert 111 zugeteilt worden ist, erhalten gleichfalls den Wert 1. Die verbleibenden Gitterpunkte erhalten jeweils den Wert 0.

Auf die so entstandenen Binärbilder wird anschließend ein Gauß-Filter nach dem

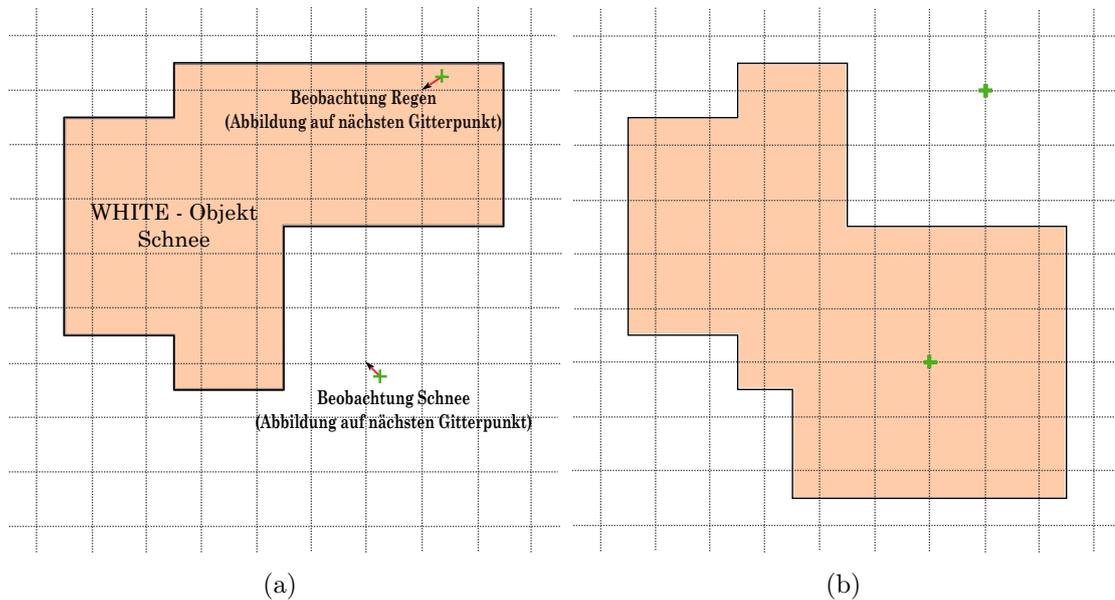


Abbildung IV.26.: Schematische Darstellung der Szenario-Korrektur. (a) zeigt schematisch ein Schneeejekt vor der Korrektur, (b) das Objekt nach der Korrektur. Die Vorgehensweise ist im Text erläutert.

Vorbild von Rad-TRAM (Kober & Tafferner, 2009) angewandt, um die Konturen zu glätten und kleinere Störstrukturen zu entfernen. Um derartige Störstrukturen komplett auszuschließen, eliminiert das System isolierte Gitterpunkte, die nicht mindestens einen Nachbarpixel in ihrer direkten Umgebung besitzen.

Der nächste Schritt beinhaltet eine morphologische Bildverarbeitung aller Binärbilder in Form einer Dilatation. Bei einer Dilatation werden Pixelwerte von 0 auf 1 geändert, wenn in der Nachbarschaft des Gitterpunkts bereits mindestens ein Pixel ebenfalls den Wert 1 besitzt. Das binäre Objekt wird also systematisch ausgedehnt und löchrige Strukturen innerhalb der Objekte werden geschlossen. Außerdem verschmelzen nahe beieinander liegende Objekte durch die Dilatation zu einem großen Objekt. Dies erleichtert die Darstellung und erhöht die Verständlichkeit der Wetterobjekte. WHITE berücksichtigt bei der Dilatation die 5 x 5-Umgebung jedes Gitterpunktes in der jeweiligen Modellschicht.

IV.3.5. Modul 5: Szenario-Korrektur

Das Modul Szenario-Korrektur überprüft die horizontalen Winterwetterobjekte der bodennahen Modellschicht auf ihre Konsistenz mit Beobachtungsdaten. Das Modul wurde für den quasioperationellen Betrieb während der Kampagne 2013/2014 in optionaler Fassung in das System integriert. Die Ergebnisse, die während der

Kampagne in Echtzeit veröffentlicht wurden (vgl. Kapitel IV.3.6) berücksichtigten die Korrekturen dieses Moduls. Um die Qualität der unkorrigierten Wetterobjekte abschätzen zu können, wurde für die Evaluierung (vgl. Kapitel IV.5.2) dieses Moduls übergangen und die originalen Ergebnisse gespeichert. Die Beobachtungen für die Konsistenzüberprüfung stammen von den bemannten und automatischen Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes und liegen halbstündlich bzw. stündlich vor (vgl. Kapitel IV.3.1.1). Theoretisch könnten an dieser Stelle auch die Meldungen der Web-Applikation WRAP (siehe Kapitel IV.4) integriert werden. Entsprechende Testläufe belegen die Machbarkeit und die Perspektiven dieses Ansatzes. In den quasioperationellen Tests während der Kampagnen wurden diese Daten jedoch noch nicht berücksichtigt. Obwohl grundsätzlich von einer Zuverlässigkeit der Meldungen ausgegangen wird, muss dennoch mit diversen Fehlmeldungen gerechnet werden. In der frühen Testphase von WHITE, in der die Ergebnisse des Systems auch laufend für eine Optimierung der Algorithmen benutzt wurden, wären diese Falschmeldungen kontraproduktiv. Für weitere Forschungen könnten in Zukunft zum Beispiel Systeme realisiert werden, die in der Lage sind fehlerhafte Meldungen zu identifizieren und auszusortieren (vgl. z.B. Christin u. a. 2014). Die Beobachtungen der Wetterstationen werden hingegen als zuverlässige Informationsquelle angenommen. Dennoch sind auch bereits in der aktuellen Version von WHITE Qualitätsschranken implementiert und nicht jede Beobachtung wird im Modul Szenario-Korrektur berücksichtigt.

Das Ziel dieses Moduls ist die Korrektur der Klassifikation an Gitterpunkten, an denen die Objekte zum Analysezeitpunkt nicht mit den verfügbaren Beobachtungen konsistent sind. Die Konsistenzprüfung wird jeweils für die unterste Modellschicht und für jede Wetterklasse durchgeführt. Abbildung IV.26 zeigt beispielhaft in schematischer Form die Vorgehensweise der Korrektur eines horizontalen Schneeobjekts für den Analysezeitschritt. Als ersten Schritt sucht das Modul hier für jede Beobachtung von Schnee den nächstgelegenen Gitterpunkt nach Gleichung IV.5 und bildet die Meldung darauf ab. Ist an diesem Gitterpunkt kein passendes Schneeobjekt vorhanden, wird in der 11×11 -Umgebung des Gitterpunktes danach gesucht. Wenn diese Suche erfolgreich verläuft, wenn also das Schneeobjekt vorhanden und nur räumlich etwas verschoben ist, kann das System die fehlerhafte originale Klassifikation des Gitterpunktes sowie die Klassifikation seiner 5×5 -Umgebung und den dazugehörigen Gitterpunktsäulen korrigieren. Dabei wird jeweils die Klassifikation der Gitterpunktsäule übernommen, an der das Objekt gefunden wurde und die geografisch am nächsten am Beobachtungsgitterpunkt liegt. Die Anpassung und Korrektur erfolgt also nicht nur für die horizontalen Objekte der untersten Modellschicht, sondern schließt auch die vertikalen Klassifikationsprofile der Umgebung und damit auch die vertikalen Wetterobjekte und die horizontalen Wetterobjekte der höheren Modellschichten mit ein. Um die Korrekturen auch in das Nowcasting zu übernehmen, werden für die Nowcasting-Zeitschritte dieselben Gitterpunkte, die im Analysezeitschritt als fehlerhaft identifiziert wurden, auf analoge Weise korrigiert. Zusätzlich erweitert das Modul in gleicher Vorgehensweise auch

die Indikatorfelder des Szenarios „Boden“.

Ist dagegen am Beobachtungsgitterpunkt ein Schneeobjekt vorhanden, obwohl dort eine Meldung Regen oder kein Niederschlag vorliegt, wird das Schneeobjekt verkleinert, wenn nicht die komplette 11 x 11 - Umgebung des Gitterpunktes innerhalb des Schneeobjektes liegt. Liegt also ein Gitterpunkt der Umgebung außerhalb des Objektes, wird dessen Klassifikationsprofil auf die Gitterpunktsäulen der 5 x 5 - Umgebung übertragen. Analog gilt wieder die Vorgehensweise für die Nowcasting-Felder und die Indikatorfelder des Szenarios „Boden“. Die Methodik, die hier exemplarisch für Schnee erläutert wird, ist im Modul genauso für die Niederschlagsobjekte Mischniederschlag, gefrierender Regen und Eisregen realisiert. Vereisung ist nicht eindeutig mit einer Wetterbeobachtung verknüpft und wird in der aktuellen Version von WHITE im Modul Szenario-Korrektur nicht berücksichtigt.

Nach der Anpassung der Klassifikationsfelder an die Beobachtungen durchläuft WHITE erneut das Modul 4. Dort werden anhand der korrigierten Felder neue Wetterobjekte berechnet.

IV.3.6. Die Ausgabe des WHITE-Systems

Das WHITE-System gibt die Wetterobjekte sowohl in grafischer Form, als auch als XML¹-Datei aus. Während der DLR-Winterwetterkampagnen wurden die Grafiken auf einer eigens entwickelten Webseite (vgl. Abbildung IV.37 in Kapitel IV.5.1) in Echtzeit zur Verfügung gestellt. Die XML-Dateien wurden ebenfalls während der Kampagnen von der WHITE-Webapplikation WRAP genutzt (vgl. Kapitel IV.4.2.3). Außerdem ist es unproblematisch, das plattformunabhängige und weit verbreitete XML-Format in andere Darstellungssysteme einzugliedern. Die XML-Ausgabe von WHITE wurde beispielsweise im Rahmen eines von der Europäischen Union geförderten internationalen Projekts in die von der spanischen Firma HYDS (Hydrometeorological Innovative Solutions S. L.) (HYDS, 2014) entwickelten und kommerziell vertriebenen Plattform MEDUSA (Meteorological Decision Support System for Aviation) zu Präsentationszwecken integriert. MEDUSA ist ein System, das die Entscheidungsträger an Flughäfen über kritische Wettersituationen informieren und bei der Entscheidungsfindung unterstützen soll. Dafür werden wissenschaftliche Ergebnisse in grafisch ansprechender und übersichtlicher Form visualisiert (MEDUSA, 2014).

¹Extensible Markup Language

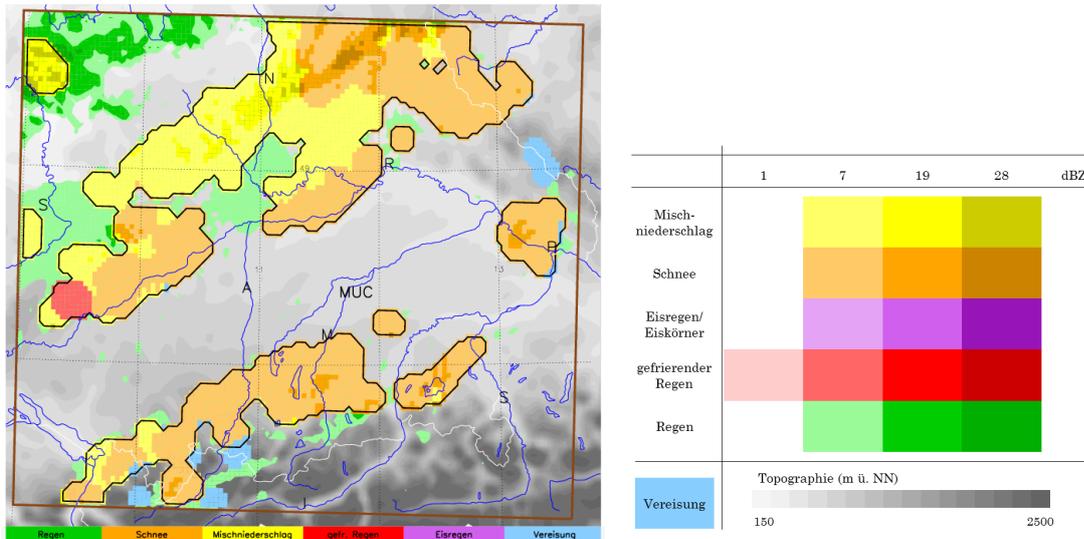


Abbildung IV.27.: Grafische Ausgabe von WHITE. Gezeigt ist exemplarisch horizontale Winterwetterobjekte in der untersten Modellschicht (2 m) inklusive Farblegende für die Szenarien und topographischen Höhenschichten.

IV.3.6.1. Grafische Ausgabe

Für die Darstellung auf der WHITE-Internetseite erzeugt das System für verschiedene Höhen und für alle Zeitschritte Horizontalschnitte. So wird die unterste Schicht des Modellschichtes (2 m über dem Erdboden) genauso geplottet wie die Bodenschicht. Zusätzlich wird für 200 m und 1000 m über dem Grund die jeweilige Höhe in jeder Gitterpunktsäule ermittelt. Für diese Höhen berechnet und erstellt WHITE ebenfalls Horizontalschnitte. Da die Winterwetterbedingungen am Flughafen München im Fokus der Forschungen von WHITE stehen, ist die Darstellung auf ein Gebiet um den Flughafen beschränkt (vgl. Kapitel IV.5.1). In Abbildung IV.27 ist ein Beispiel der 2 m-Schicht gezeigt. Für die grafische Ausgabe kombiniert WHITE die horizontalen Winterwetterobjekte gefrierender Regen, Eisregen, Schnee und Mischniederschlag zu einem Winterwetterobjekt und umrandet dieses mit einer Kontur. Falls sich die einzelnen Objekte innerhalb des Niederschlagsobjekts überschneiden, werden in den Darstellungen die für den Luftverkehr unproblematischeren Objekte von den potentiell gefährlicheren überlagert. Mischniederschlagsobjekte werden dabei von Schnee, Schneeobjekte von Eisregen und Eisregenobjekte von gefrierendem Regen bedeckt. Die Vereisungsobjekte werden an den Gitterpunkten, an denen keine Überschneidung mit Niederschlagsobjekten besteht, separat und ohne umrandende Konturlinie dargestellt. Für die Darstellung der Bodenschicht kombiniert das System die Neuschneeobjekte und die Glatteisobjekte ebenfalls zu einem gemeinsamen Objekt, wobei Neuschnee im Überschneidungsfall von Glatteis überlagert wird.

```
<grid>
  <gridpoint>
    <index1>0</index1>
    <index2>0</index2>
    <index3>0</index3>
    <lat>47.2457</lat>
    <lon>9.00694</lon>
    <h>621.940</h>
    <scen>22</scen>
  </gridpoint>
  <gridpoint>...</gridpoint>
</grid>
```

Abbildung IV.28.: XML-Ausgabe von WHITE. Gezeigt ist das XML-Element der südwestlichen Modellecke der untersten Modellschicht. Die Attribute `<lat>` und `<lon>` beinhalten Längengrad und Breitengrad, `<h>` enthält die Höhe des Gitterpunktes in Meter über Normalnull. `<scen>` beinhaltet die Information über das Wetterobjekt am Gitterpunkt.

IV.3.6.2. XML-Ausgabe

Die Ausgabe als XML-Datei kann optional für das dreidimensionale Modellgitter oder für einzelne Modellschichten (zweidimensional) erfolgen. In Abbildung IV.28 ist die Ausgabe des kompletten dreidimensionalen Gitters angedeutet. In seiner quasioperationell betriebenen Version während der Kampagnen erzeugt WHITE nur für die unterste Modellschicht eine XML-Ausgabe, da die XML-Dateien ausschließlich von WRAP benutzt werden und für die Nutzer der Applikationen vor allem das Wetter in Bodennähe interessant ist. Die Implementierung von WRAP weist jedem XML-Element je nach Klassifikation und Radarreflektivität unterschiedliche Attribute zu, die durch Informationen über geografische Position und Höhe (optional) erweitert werden. Für jeden Zeitschritt und zusätzlich für die Bodenschichten erzeugt WHITE separate XML-Dateien, die WRAP verarbeitet und deren Inhalt visualisiert.

IV.4. Das Participatory-Sensing-Konzept von WHITE

Neben dem in Kapitel IV.3 ausführlich beschriebenen Nowcasting-System besitzt WHITE mit dem Participatory-Sensing-Ansatz ein weiteres Hauptelement. Ziel dieses Elements ist es, den Datenaustausch zwischen dem Nowcasting-System und den Teilnehmern der DLR-Winterwetterkampagne (vgl. Kapitel IV.5) zu erleichtern, das System so bei potentiellen Kunden und Nutzern einzuführen und die Nutzer mit dem System vertraut zu machen. Als positiver Nebeneffekt können zusätzliche Daten für die Evaluierung des Systems gesammelt werden. In Zukunft könnten diese Daten auch in Echtzeit die Szenario-Korrektur bereichern und das Nowcasting-System optimieren. In den folgenden Kapiteln wird die Motivation für die Entwicklung des Konzepts und deren Umsetzung und Anwendung erläutert.

IV.4.1. Der Hintergrund des Participatory-Sensing-Konzepts

Die mobile Internetnutzung gewinnt seit einigen Jahren immer mehr an Bedeutung. Allein ein Vergleich verschiedener Statistiken der vergangenen beiden Jahre zeigt einen rasanten Anstieg. Laut einer Studie der Initiative D21 (2013) stieg der Anteil der mobilen Internetnutzer von 27 Prozent im Jahr 2012 auf 40 Prozent im Jahr 2013 an. In der Gruppe der Menschen, die auch auf andere Möglichkeiten der Internetnutzung zurückgreifen, und die etwa 76 Prozent der Gesamtbevölkerung in Deutschland umfasst, offenbart sich ebenfalls eine eindeutige Entwicklung. Während im Jahr 2012 noch rund jeder dritte aus dieser Gruppe einen mobilen Internetzugang genutzt hat, ist es im Jahr 2013 bereits etwa jeder Zweite (vgl. Abbildung IV.29). Analog dazu wachsen auch die Absatz- und Nutzerzahlen von mobilen Endgeräten wie Smartphones oder Tablets seit einigen Jahren deutlich an. Die Abbildungen IV.30(a) und IV.30(b) verdeutlichen, dass in Deutschland im Jahr 2013 mehr als 26 Millionen Smartphones verkauft wurden und es bereits etwa 37 Millionen Nutzer dieser Mobilgeräte gab.

Nach einer gemeinsamen repräsentativen Untersuchung der Fachgruppe Mobile und des Online-Vermarkterkreises (OVK) im Bundesverband Digitale Wirtschaft (BVDW) e.V. sind 13,7 Millionen Bundesbürger mindestens wöchentlich über ihr internetfähiges Mobiltelefon online. Mehr als jeder zehnte Deutsche nutzt zudem das mobile Internet über ein Tablet (BVDW, 2012). Es existieren noch diverse andere interessante Studien, die die Bedeutung des mobilen Internets und insbesondere dessen Nutzung durch Smartphones belegen. Beispielsweise verlassen 75 Prozent der Deutschen das Haus niemals ohne ihr Mobiltelefon und werfen durchschnittlich alle 6.5 Minuten einen Blick auf dessen Bildschirm (IndustryStock, 2013). Eine

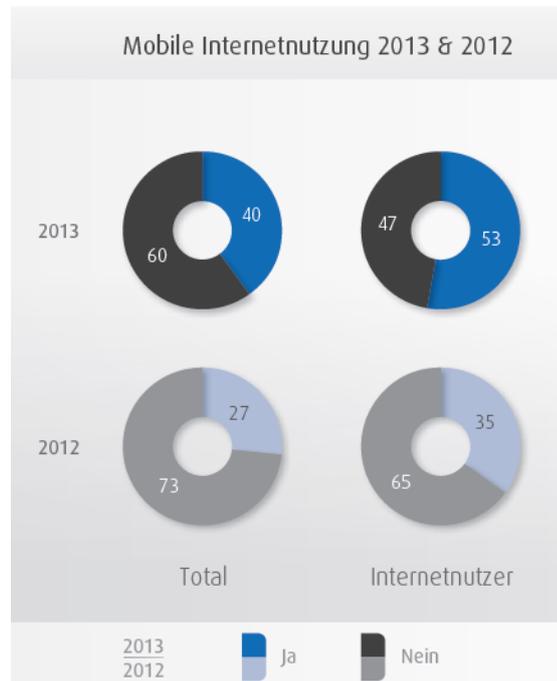
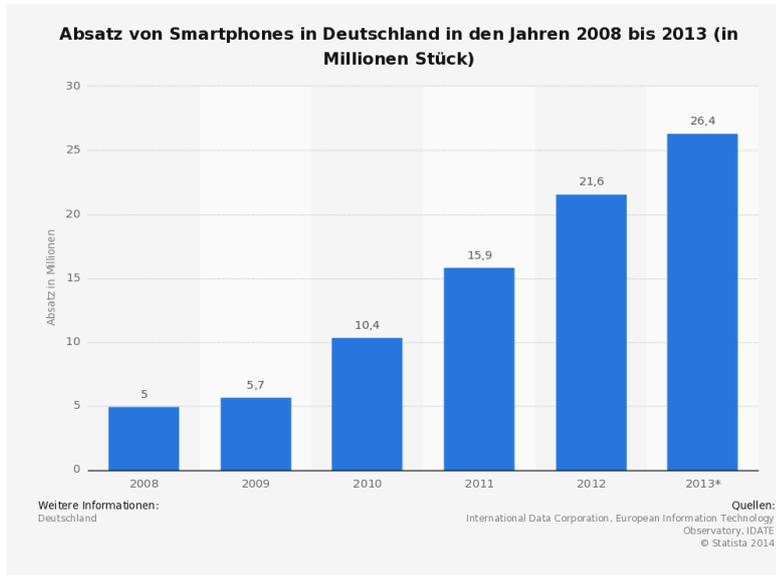


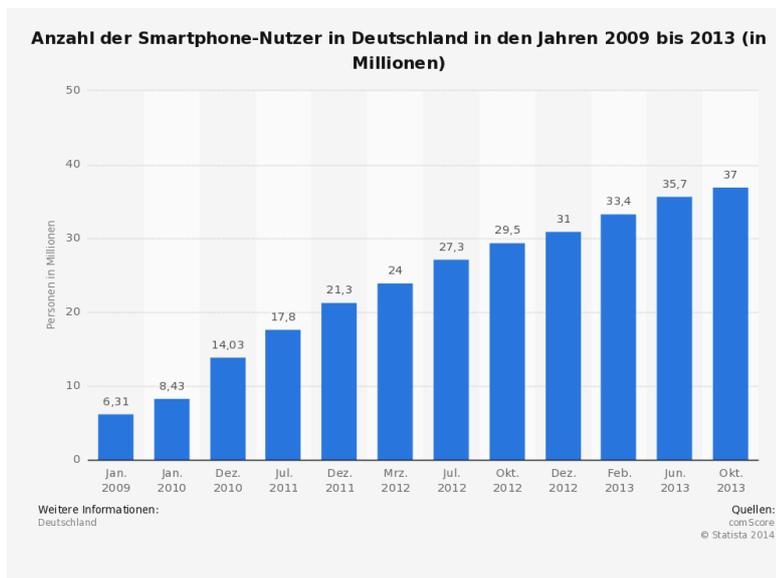
Abbildung IV.29.: Statistik über die Nutzung des mobilen Internets in den Jahren 2012 und 2013. Abbildung aus D21 (2013).

Untersuchung der International Data Corporation (IDC) fördert zu Tage, dass 63 Prozent aller Nutzer ihr Smartphone maximal eine Stunde am Tag nicht direkt bei sich tragen. Ein Viertel aller Befragten konnte sich dabei nicht einmal mehr erinnern, wann das Smartphone das letzte Mal nicht mit ihnen im selben Raum war. Auch der Tag eines Smartphone-Besitzers beginnt in der Regel mit einem Blick auf das Mobiltelefon. 62 Prozent greifen unmittelbar, 79 Prozent innerhalb der ersten 15 Minuten nach dem Aufwachen danach (Levitas, 2013).

Eines der wichtigsten Themengebiete, über das sich Smartphone-Nutzer anhand von Applikationen informieren, ist das Wetter (vgl. Abbildung IV.31). Dies eröffnet für meteorologische Forschungen ganz neue Möglichkeiten. In Verbindung mit Sensoren zur Positionsbestimmung, mit denen alle leistungsstarken mobilen Endgeräte ausgestattet sind, sind vielfältige Einsatzmethoden denkbar. Der Ansatz, der im WHITE-System realisiert ist, nutzt die Fähigkeiten der Positionsbestimmung über das mobile Netzwerk oder über GPS (Global Positioning System). In Kombination mit der Bereitschaft von Smartphone-Nutzern regelmäßige Wetterbeobachtungen über die allgegenwärtige mobile Internetverbindung zu übermitteln, werden hier Möglichkeiten aufgezeigt, die Leistungsfähigkeit und die Evaluierung des Nowcasting-Systems zu optimieren und den Kontakt und den Datenaustausch mit Kunden bzw. Kampagnenteilnehmern zu erleichtern. Diesen Ansatz, Mobilgeräte und deren Besitzer als Sensoren einzusetzen, bezeichnet man als Participatory-Sensing. In der Literatur finden sich auch die Benennungen Mobile-Phone-Sensing



(a)



(b)

Abbildung IV.30.: Entwicklung des Absatzes von Smartphones und der Anzahl der Smartphone-Nutzer in Deutschland in den vergangenen Jahren. Abbildungen aus IDC (2014) bzw. ComScore (2014).

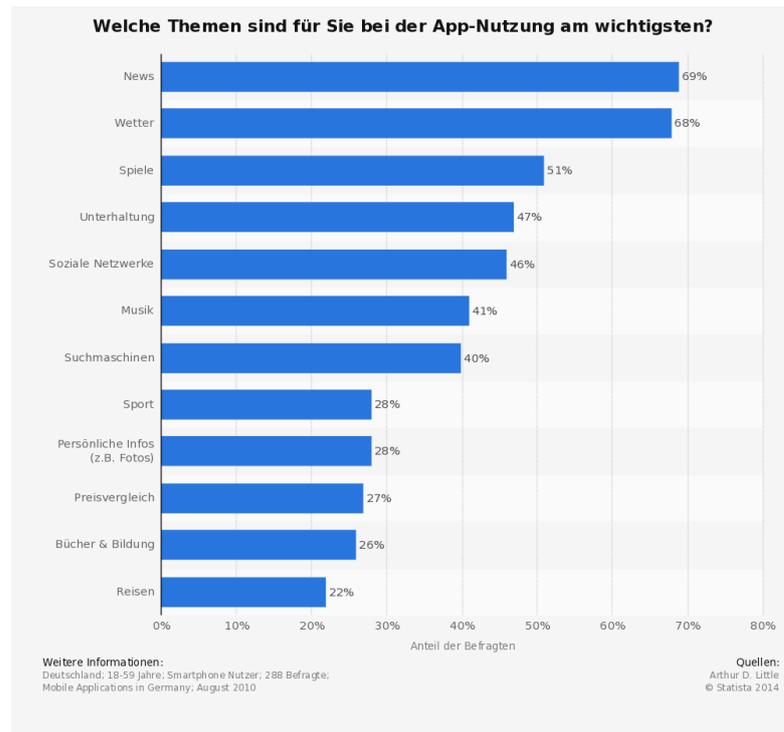


Abbildung IV.31.: Statistik über die Nutzung von Smartphone-Apps nach Themen. Abbildung aus Little (2010).

(Lane u. a., 2010) und Mobile-Crowdsensing (Ganti u. a., 2011). Da sich keiner dieser Begriffe einfach ins Deutsche übersetzen lässt, wird ab jetzt immer der Ausdruck Participatory-Sensing verwendet.

Um die Methodik des Participatory-Sensing zu veranschaulichen, werden im Folgenden einige Beispiele aus der Literatur präsentiert, die Mobilgeräte zur Erhebung von Daten einsetzen. Grundsätzlich können die Anwendungen dabei in zwei Kategorien eingeteilt werden. Die erste Kategorie behandelt hauptsächlich Messungen von Luftqualität und Lärmverschmutzung. In der zweiten Kategorie finden sich Wetterbeobachtungen oder Wetterwarnsysteme.

Interessante Projekte der erstgenannten Kategorie sind beispielsweise Haze Watch (Carrapetta u. a., 2010) oder PollutionSpy (Kanjo u. a., 2009). Bei beiden Projekten werden die Ortungsfähigkeiten der mobilen Endgeräte in Kombination mit externen Messsensoren eingesetzt, um einen Überblick über die aktuelle Luftqualität zu erhalten. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen die Projekte NoiseTube (Maison-neuve u. a., 2009), NoiseSpy (Kanjo u. a., 2009) oder Ear-Phone (Rana u. a., 2010). Hier kommt man sogar ohne externe Sensoren aus, da in diesem Fall jeweils die internen Mikrophone der Mobiltelefone als Schallsensoren verwendet werden und so potentielle Lärmverschmutzung untersucht werden kann.

Auch für die zweitgenannte Kategorie finden sich in der Literatur einige innovati-

ve Projekte. So können zum Beispiel aus den Positionsaufzeichnungen von Gleitschirmpiloten thermische Charakteristika der durchflogenen Regionen abgeleitet werden (Wirz u. a., 2011). Ein anderer Ansatz wird von Demirbas u. a. (2010) und Cox & Plale (2011) präsentiert. Beide arbeiten auf Grundlage des Mikroblogging-Dienstes Twitter. Bei Demirbas u. a. (2010) können Nutzer Fragen über die aktuelle Wettersituation in einem Gebiet twittern und erhalten die gesammelten Antworten anderer Nutzer aus diesem Gebiet in einer Wetterkarte aufbereitet dargestellt. Das Participatory-Sensing-System von Cox & Plale (2011) versucht aus individuellen beliebigen Beiträgen der Twitter-Nutzer Wetterinformation zu gewinnen und diese räumlich und zeitlich zusammengefasst als Wetterereignisse zu identifizieren. Eine alternative Idee liegt den kommerziellen Anwendungen des Baron Services Wetterwarnsystems (Richardson, 2012) zugrunde. Sobald registrierte Nutzer sich innerhalb von Gebieten mit prognostiziertem signifikantem Wetter (Gewitter, Starkregen, usw.) befinden, werden sie per Email durch automatische Warnungen darüber informiert.

IV.4.2. WRAP - Weather Report Application

Wie bereits erwähnt ist für das WHITE-System ein Participatory-Sensing-Konzept realisiert. Ziel war dabei, den Datenaustausch zwischen dem Nowcasting-System und den Teilnehmern der DLR-Winterwetterkampagne zu erleichtern und zusätzliche Daten für den quasioperationellen Betrieb und für die Validierung zu sammeln. Zu diesem Zweck wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Mobile und Verteilte Systeme des Instituts für Informatik der Ludwig-Maximilians-Universität München die Web-Applikation WRAP (Weather Report Application) entwickelt. Um möglichst viele Teilnehmer zu einer möglichst aktiven Mitarbeit zu motivieren, wurde das System auf einige Anforderungen maßgeschneidert (Keis & Wiesner, 2014):

- Benutzerfreundlichkeit: Das System ist intuitiv und einfach zu bedienen. Es sind weder Einarbeitung noch Fachwissen nötig, um die Applikation zu verwenden.
- Effizienz: Es ist möglich, die Anwendung ohne großen Zeit- und Arbeitsaufwand zu nutzen.
- Plattformunabhängigkeit: Da eine Vielzahl an unterschiedlichen Betriebssystemen existiert, muss die Anwendung auf allen Geräten funktionieren, um einer möglichst großen Anzahl an Nutzern die Teilnahme zu ermöglichen.

Ein besonderer Fokus bei der Entwicklung lag auf der Motivation der Nutzer mit Smartphone. Da immer mehr Menschen mit solchen Geräten ausgestattet sind und ein Großteil von ihnen regelmäßigen bis häufigen Gebrauch davon macht, kann bei

einer für Mobilgeräte optimierten Anwendung mit deutlich mehr Reaktionen gerechnet werden. Dennoch wurde auch eine Standard-Web-Applikation entwickelt, die sich an Nutzer mit stationären Geräten (z.B. Desktop PCs) richtet. Ausgehend von dieser Anwendung wurde die im Folgenden als mobile Applikation bezeichnete, für Mobilgeräte optimierte Web-Applikation, weiterentwickelt. Sie unterscheidet sich in der Funktionalität nicht von der Standard-Applikation, besitzt aber ein komplett separates Design, um die Anforderungen Benutzerfreundlichkeit, Effizienz und Plattformunabhängigkeit zu erfüllen.

IV.4.2.1. Die Standard-Web-Applikation (DCP WRAP)

Abbildung IV.32 zeigt einen Screenshot der Standard-Web-Applikation. Die Karte dient dabei zur Positionsbestimmung des Nutzers. In Abhängigkeit vom Browser kann dabei die automatische Lokalisierung über die Geolocation API² zugelassen werden. Die Karte zeigt die individuelle Position durch die Markierung an. Durch einfaches Klicken auf die Karte kann diese Markierung alternativ auch selbstständig gesetzt oder korrigiert werden. Unterhalb der Karte erscheinen die geografischen Koordinaten der ermittelten Position in den Feldern *Latitude* und *Longitude*. Innerhalb des Auswahlmenüs unter der Überschrift *Code* wird das Szenario selektiert, welches der aktuellen Wettersituation entspricht. Zur Auswahl stehen hier die Winterwetterszenarien Schnee, Mischniederschlag, Regen, Niesel, gefrierender Regen, Eisregen/Eiskörner, Nebel und kein Niederschlag. Um Meldungen von automatischen Skripten und sogenannten Spambots zu vermeiden, muss zudem ein Captcha³ angegeben werden, bevor die Daten an den DLR-Server, auf dem alle Meldungen zusammen mit dem Zeitstempel gespeichert werden, geschickt werden können.

IV.4.2.2. Die mobile Applikation (mobile WRAP)

Das Aussehen der mobilen Applikation ist dargestellt in den Abbildungen IV.33(a) und IV.33(b). Um die Anforderungen Benutzerfreundlichkeit, Effizienz und Plattformunabhängigkeit zu erfüllen und ein möglichst großes Publikum anzusprechen, ist die Anwendung eine für sogenannte Touchscreens optimierte Version der Standard-Applikation, ohne dabei an Funktionalität zu verlieren. Sie ist implementiert in HTML5 und somit unabhängig vom Betriebssystem. Sie kann wie jede andere Internetseite einfach über den Browser der Mobilgeräte erreicht werden, ohne vorher eine Installation durchführen zu müssen. Auch die Wartung der mobilen App ist so deutlich erleichtert. Zur Effizienzsteigerung kann die App als Link auf den Startseiten des Smartphones verknüpft werden. Die Anleitung dazu wurde innerhalb

²<http://dev.w3.org/geo/api/spec-source.html>

³captcha: completely automated public Turing test to tell computers and humans apart

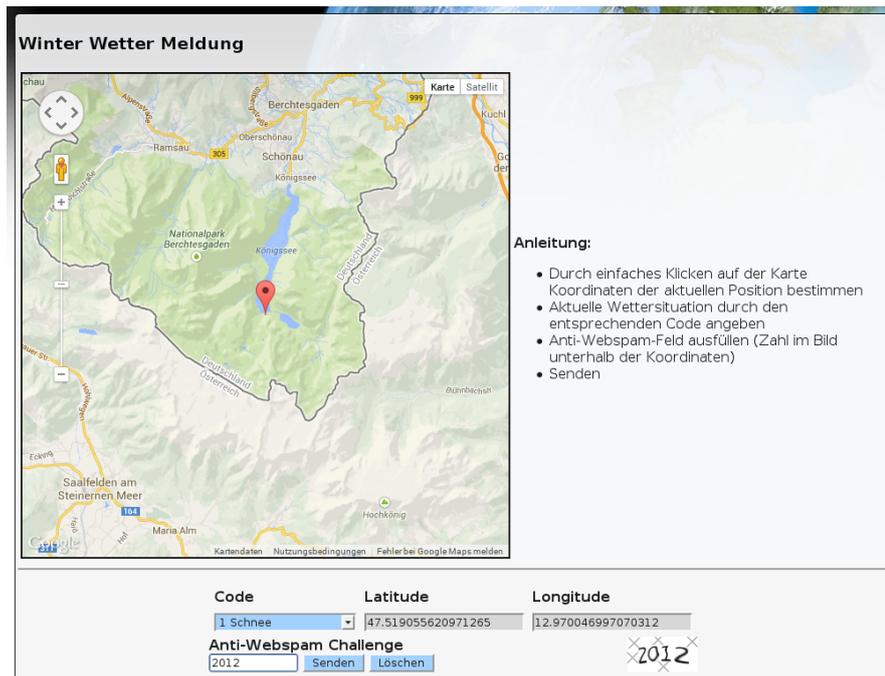


Abbildung IV.32.: Screenshot der Standard-Web-Applikation (DPC WRAP)

der App als Bookmark Bubble integriert. Die Bookmark Bubble ist ein Hinweis, der beim Aufruf der App erscheint und die Verknüpfungsanleitung in Abhängigkeit vom Betriebssystem des mobilen Endgeräts enthält (vgl. Abbildung IV.33(c)). Nach dreimaligem Schließen der Bookmark Bubble erscheint sie bei weiteren Aufrufen der Seite nicht mehr.

Die Benutzeroberfläche der App ist unter Verwendung von jQuery Mobile⁴, ein für Smartphones und Tablets optimiertes Web-Framework, implementiert. Wie in den Abbildungen IV.33(a) und IV.33(b) zu erkennen, ist auch das Design komplett für den Gebrauch auf Mobilgeräten optimiert. Folgende Aspekte sind dabei umgesetzt:

- Weniger Text: Oft ist es beschwerlich längere Texte auf Mobilgeräten zu lesen, vor allem wenn man dabei unterwegs ist, wie es mit Smartphones oft der Fall ist. Deswegen ist die textliche Anleitung für die mobile Version entfernt.
- Weniger Interaktion: Die Karte ist entfernt und ersetzt durch eine universelle Positionserkennung. Grundlage dafür ist wieder die oben bereits erwähnte GeoLocation API, mit deren Hilfe die spezifische Position entweder ungefähr über den Standort im mobilen Netzwerk oder exakt über GPS bestimmt werden kann. Der Nutzer muss dazu die Positionsbestimmung für die mobile

⁴<http://jquerymobile.com>

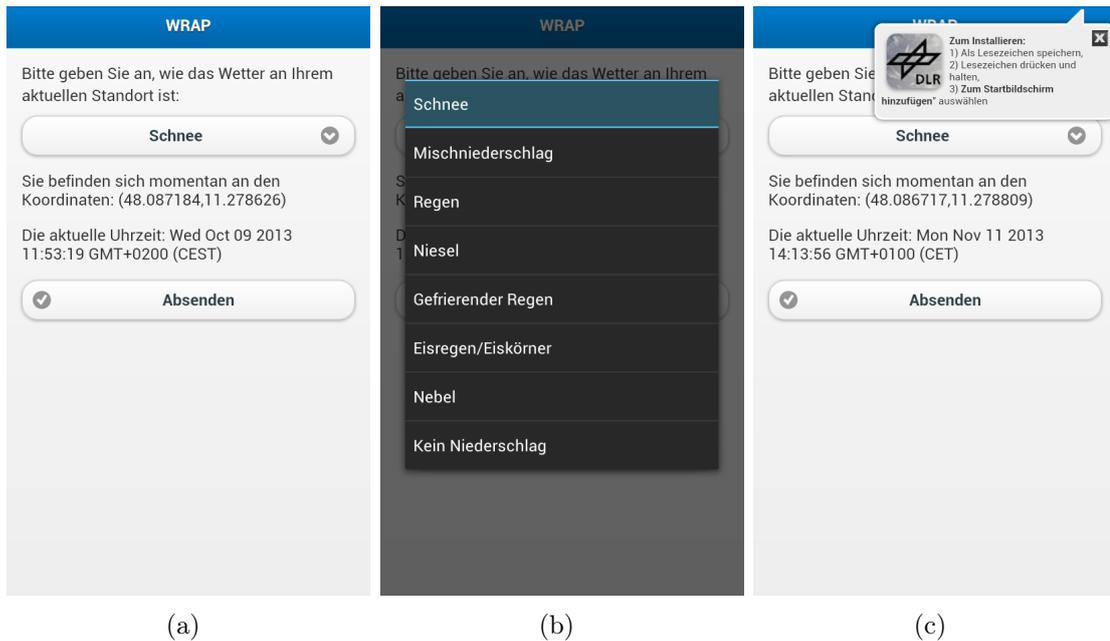


Abbildung IV.33.: Screenshots der mobilen Web-Applikation WRAP. Abbildung (a) zeigt die Hauptseite der Applikation. Geografische Position und Uhrzeit werden automatisch bestimmt. Abbildung (b) zeigt das Auswahlmenü für das Winterwetter. Abbildung (c) zeigt die Bookmark Bubble. Alle Screenshots wurden aufgenommen mit einem HTC One S unter dem Betriebssystem Android 4.1.1. Die Anzeige des Auswahlmenüs und die Anzeige und der Inhalt der Bookmark Bubble auf anderen Geräten variieren je nach Betriebssystem und Browser.

Applikation erlauben. Eventuell muss dazu die entsprechende Einstellung des Mobilgeräts geändert werden.

- Größere Bedienelemente: Alle Schaltflächen und Auswahlmenüs sind auf die volle Breite des Bildschirms vergrößert. Die Bedienung auf Touchscreens ist so deutlich erleichtert.
- Weniger Barrieren: Für das Tippen auf Mobilgeräten gilt dieselbe Aussage wie für das Lesen. Deswegen ist der Captcha in der mobilen Version nicht integriert.

IV.4.2.3. Die Kommunikation zwischen WRAP und dem Nowcasting-System von WHITE

Beide Anwendungen interagieren auch direkt mit dem Nowcasting-System von WHITE. So erhält jeder Nutzer nach erfolgreichem Abschicken der Meldung eine angepasste Visualisierung der aktuellen Vorhersagen für seine Position ange-

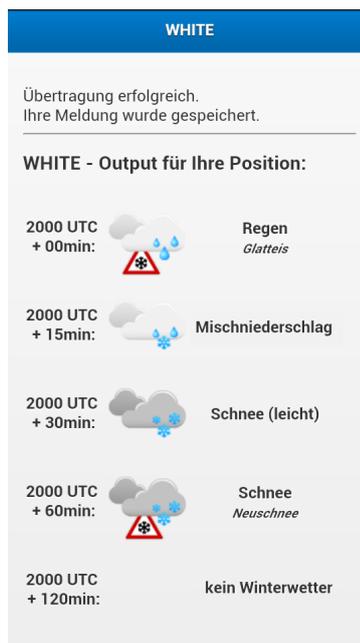


Abbildung IV.34.: Screenshot der Antwortseite der mobilen Version von WRAP. Die Abbildung zeigt exemplarisch den Output des WHITE-Nowcasting-Systems auf dem Standardbrowser eines HTC One S unter dem Betriebssystem Android 4.1.1

zeigt. Zu sehen ist das in Abbildung IV.34. Die Informationen, die mit Hilfe von WRAP gesammelt werden, werden an ein in PHP implementiertes Skript übergeben. Dieses automatische Skript durchsucht die von WHITE erzeugten XML Dateien nach den jeweiligen Koordinaten und übermittelt die Nowcasting-Ergebnisse an die WRAP-Antwortseite. Die Übergabe der mobilen Version ist implementiert in AJAX⁵. Auf der Antwortseite wird die codierte Information in eine graphisch anschauliche Form und eine stichpunktartige Erläuterung umgewandelt. Gleichzeitig speichert das PHP-Skript die gesendeten Information in einer separaten Datei. So können die Meldungen im nächsten Analyseschritt bei der Szenario-Korrektur berücksichtigt werden und bei der Validierung der Qualität von WHITE behilflich sein.

⁵AJAX: Asynchronous JavaScript and XML

IV.5. Die DLR-Winterwetterkampagnen - WHITE im quasioperationellen Testbetrieb

In den Wintern 2012/2013 und 2013/2014 wurde WHITE jeweils von Anfang Dezember bis Ende März im quasioperationellen Betrieb getestet. Sowohl das Nowcasting-System, als auch das Participatory-Sensing-Konzept kamen dabei zum Einsatz. Ziel war zum einen, eine erste Qualitätsanalyse des Nowcasting-Systems zu erhalten und die Algorithmen sowie die Anwendung der Fuzzy-Logik zu optimieren, und zum anderen, das System und das Konzept bei potentiellen Nutzern vorzustellen.

IV.5.1. Die Organisation und der Ablauf der Kampagnen

Für den Testbetrieb wurde der Flughafen München ausgewählt. Während der Kampagnen wurde WHITE für ein Untersuchungsgebiet um den Flughafen kompiert und im quasioperationellen Betrieb getestet. Das Untersuchungsgebiet ist definiert über die Grenzen mit den Koordinaten 9° Ost und $13,75^\circ$ Ost sowie $47,25^\circ$ Nord und $49,75^\circ$ Nord. Wie bereits in Kapitel IV.3.1.1 erwähnt, deckt das Gebiet 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 (vgl. Abbildung IV.35).

Die beiden Kampagnen wurden jeweils durchgeführt von Anfang Dezember bis Ende März. In dieser Zeitspanne lief WHITE im quasioperationellen Modus und interessierte Nutzer konnten mithilfe von WRAP an der Kampagne teilnehmen. Im Winter 2013/2014 wurden die WRAP-Meldungen testweise in Echtzeit im Modul Szenario-Korrektur eingebunden und trugen so direkt zur Verbesserung der Ergebnisse bei. Der zeitliche Ablauf von WHITE während der Kampagne ist dargestellt in Abbildung IV.36. Dort ist die Situation für 12:00 UTC gezeigt. Im COSMO-DE Modell werden zu den Startterminen 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC Vorhersagen für die folgenden 18 Stunden erstellt. Die Fertigstellung der Vorhersagen dauert in etwa eine Stunde. Für die Entwicklung von WHITE wurde ein Forschungszugang zum SKY-Datenbanksystem des DWD eingerichtet, über den sowohl die Modellvorhersagen als auch Beobachtungsdaten bezogen werden konnten. Um einen stabilen erfolgreichen Zugriff auf die Datenbank zu gewährleisten, wurde der Download der Modellvorhersagen jeweils zwei Stunden und 50 Minuten nach jedem Hauptlauftermin gestartet. Es wurden dabei die Datenfelder zu den Vorhersagezeiten +03 bis +08 aus der Datenbank entnommen. Für 12:00 UTC wurde also jeweils die drei Stunden Vorhersage des Hauptlaufes um 09 UTC als die aktuellste verfügbare Modellprognose ermittelt. Die Beobachtungsdaten der Wetterstationen und Wetterwarten wurden jeweils 10 Minuten nach jeder halben

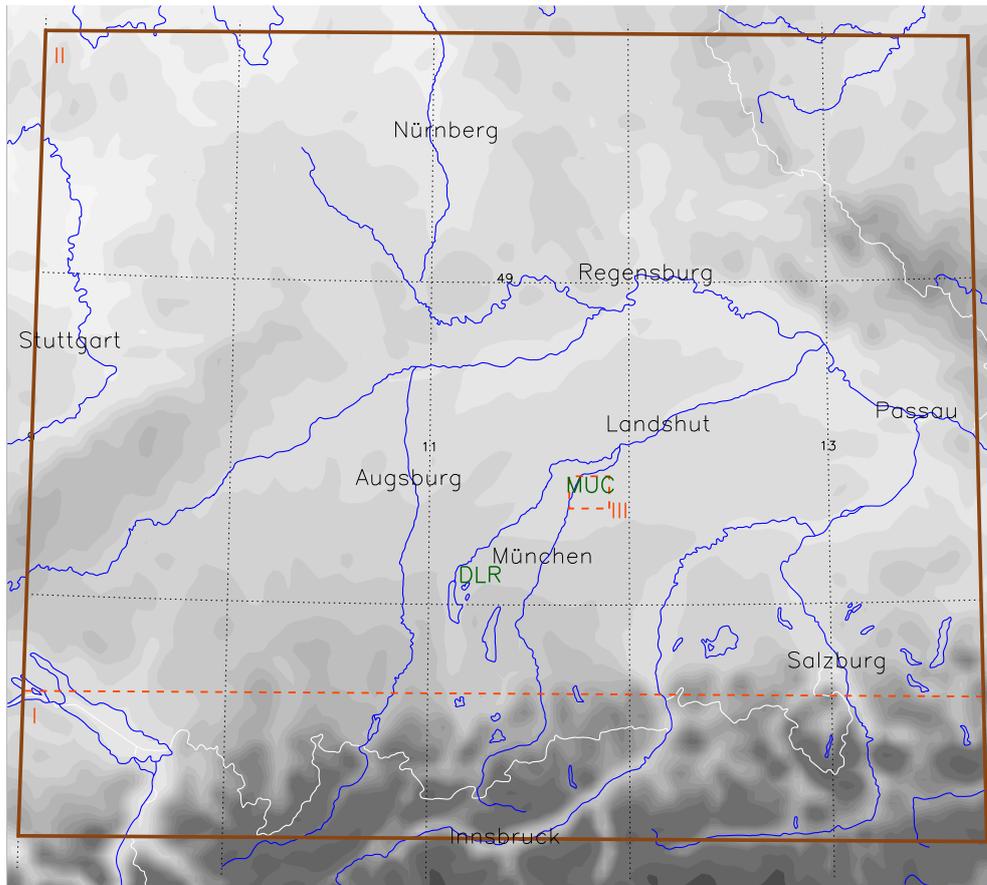


Abbildung IV.35.: Karte des Untersuchungsgebiets um den Flughafen München während der DLR-Winterwetterkampagnen. Die DLR Niederlassung Oberpfaffenhofen und der Flughafen München sind grün gekennzeichnet. Die roten Markierungen zeigen die Evaluierungszonen Alpen (I), Bayern (II) und Flughafen München (III).

und vollen Stunde aus der Datenbank bezogen, um die Berücksichtigung möglichst vieler Daten zu garantieren. Die Daten des deutschlandweiten Radarkomposits RX und der SWIS-Stationen werden am Institut für Physik der Atmosphäre zu Forschungszwecken operationell vom DWD bezogen und lagen so aktuell zu jedem Analysezeitpunkt von WHITE in Echtzeit vor.

Während der Kampagnen wurde WHITE für ein Gebiet um den Flughafen München implementiert. Jeweils vor Beginn der Kampagnen wurde WHITE am Flughafen vorgestellt, wobei verschiedene Nutzergruppen zur Teilnahme am Participatory-Sensing-Konzept motiviert werden konnten:

- Mitarbeiter des Instituts für Physik der Atmosphäre des DLR,
- Mitarbeiter der Verkehrsleitung der Flughafen München GmbH,

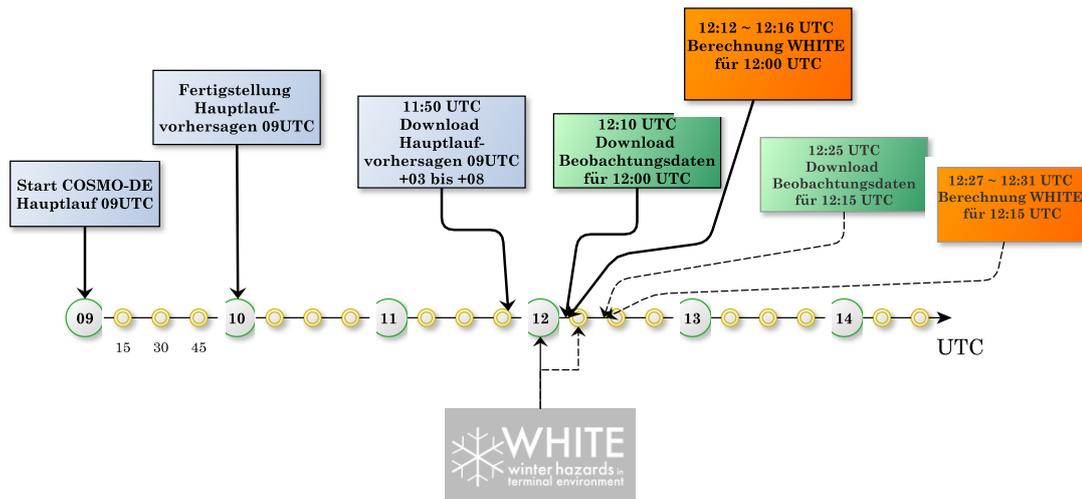


Abbildung IV.36.: Operationeller Ablauf des Nowcasting-Systems von WHITE während der Kampagnen. Gezeigt ist exemplarisch die Situation um 12:00 UTC. Um aktuelle Beobachtungs- und Radardaten berücksichtigen zu können, wurde das System jeweils 12 Minuten nach der angegebenen Analysezeit gestartet. Die Berechnung der Winterwetterobjekte für die Analyse und das Nowcasting nahm in der aktuellsten Version in etwa vier bis fünf Minuten in Anspruch. Es wurden jeweils Prognosen für den Vorhersagezeitraum von 15 Minuten, 30 Minuten, 60 Minuten und 120 Minuten berechnet. Die COSMO-DE Modellvorhersagen des 09 UTC Laufes wurden bis einschließlich 14:45 UTC verwendet, ehe für die 15:00 UTC Berechnung die Vorhersagen des 12 UTC Laufes verfügbar waren. Beobachtungs- und Radardaten wurden für jeden Berechnungsschritt neu einbezogen. Unterhalb der Zeitachse ist gezeigt, für welche Zeitpunkte der 12:00 UTC Lauf von WHITE eine Ausgabe lieferte. Das Nowcasting-System wurde alle 15 Minuten gestartet.

- Mitarbeiter der Deutschen Flugsicherung am Flughafen München ,
- Mitarbeiter des flugmeteorologischen Vorhersagedienstes des DWD am Flughafen München,
- Mitarbeiter und Studenten des Meteorologischen Instituts der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Alle Teilnehmer der Kampagne besitzen meteorologische Kenntnisse oder Erfahrungen mit Winterwettersituationen. Die mithilfe von WRAP gesammelten Daten besitzen deswegen eine grundsätzliche Verlässlichkeit.

Zusätzlich zum Participatory-Sensing-Konzept wurden die aktuellsten Vorhersagen für unterschiedliche Höhenstufen auf einem eigens programmierten Internetauftritt veröffentlicht. Neben den Nowcasting-Ergebnissen wurden dort auch METAR-Meldungen und Ergebnisse von Radiosonden-Aufstiegen sowie Messungen der DLR-

Messplattformen Poldirad, Parsivel und MRR (vgl. Kapitel IV.1) gezeigt. Verlinkungen zu den beiden WRAP-Methoden, diverse Informationen und Bedienungshinweise sowie erste Qualitätsanalysen rundeten das Angebot des WHITE-Internetauftritts ab. Abbildung IV.37 zeigt einen Screenshot der Internetseite. Wie die mobile Version von WRAP ist auch der WHITE-Internetauftritt für die Darstellung auf mobilen Endgeräten optimiert. Die Schaltflächen der Navigationsleisten sind deutlich groß gehalten, um die Bedienung auf Touch-Bildschirmen zu erleichtern. Unterschiedliche Farben, die in der Legende unterhalb der Kartendarstellung definiert sind, kennzeichnen die verschiedenen Winterwetterszenarien. Die Helligkeit der Farben steht in direktem Zusammenhang mit der ermittelten Radarreflektivität an diesem Gitterpunkt (vgl. Abbildung IV.27 in Kapitel IV.3.6). Die Kartendarstellung konnte für die Bodensituation und für die Wetterszenarien in der untersten Modellschicht sowie für Schichten von 200 m und 1000 m über dem Grund angezeigt werden. Außerdem konnte über die Schaltfläche im rechten unteren Eck die Farbdarstellung der verschiedenen Szenarien ausgeblendet werden. In diesem Fall wurden nur die Konturen der Wetterobjekte als Überlagerung zum Reflektivitätsfeld sichtbar gemacht. Oberhalb der Kartendarstellung wurden Datum, Uhrzeit und Vorhersagezeitrahmen dargestellt. Diese Elemente wurden ebenso wie die Kartendarstellung als Dauerschleife der aktuellen Analyse und der zugehörigen Prognosen realisiert. Ein grüner Punkt in der oberen Ecke deutete dabei an, dass die gezeigten Darstellungen die aktuellsten verfügbaren Ergebnisse beinhalteten, während ein roter Punkt darauf hinwies, dass - aus welchen Gründen auch immer - keine aktuellen Bilder vorlagen.

IV.5.2. Evaluierung der gesammelten Daten

Während der Kampagnen in den Wintermonaten 2012/2013 und 2013/2014 wurde eine Vielzahl an Daten gesammelt. Die Analyse- und Vorhersageobjekte jedes Zeitschritts wurden ebenso aufbewahrt wie die eingegangenen WRAP-Meldungen. Da vor allem die Qualitätsbeurteilung der Fuzzy-Algorithmen im Mittelpunkt der Evaluierung stehen soll, wird die Verifikation lediglich für die unkorrigierten WHITE-Wetterobjekte durchgeführt. Das Modul 5 Szenario-Korrektur wird im Zuge der Evaluierung in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Dieses Kapitel präsentiert eine Beurteilung des Erfolges des Participatory-Sensing-Ansatzes und untersucht die Qualität der unkorrigierten Ergebnisse des Nowcasting-Systems. Außerdem werden Fallstudien gezeigt, die die Leistungsfähigkeit von WHITE deutlich machen.

Die Verifikation als Bewertung der Qualität eines meteorologischen Vorhersagesystems ist ein seit langem bearbeitetes Forschungsfeld. Dennoch - oder vielleicht gerade deswegen - existiert kein allgemein anerkanntes unumstrittenes Standardverfahren, mit dem die Qualität einer Vorhersage bewertet wird. Vielmehr wurde in der Vergangenheit eine bunte Vielfalt an Verifikationsprozeduren entwickelt, um

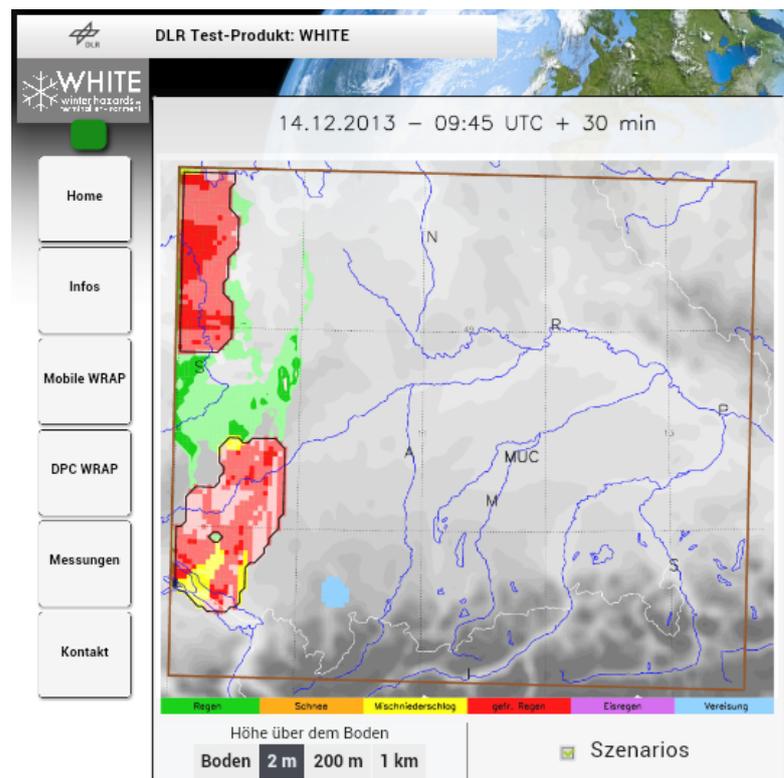


Abbildung IV.37.: Screenshot des WHITE-Internetauftritts aufgenommen mit dem Standardbrowser eines HTC One S unter dem Betriebssystem Android 4.1.1.

den Vergleich zwischen Vorhersage und Beobachtung zu bewerten (Wilks, 2006). Die Ausgabe deterministischer Vorhersagesysteme kann anhand sogenannter Kontingenztafeln (Tabelle IV.13) kategorisiert werden.

Darin wird eine korrekte Vorhersage als „hit“, eine fehlerhafte Vorhersage als „false alarm“ und eine fehlende Vorhersage als „miss“ bezeichnet. Bei einem „hit“ wird ein Ereignis sowohl vorhergesagt als auch beobachtet. Ein „false alarm“ wird prognostiziert aber nicht beobachtet und bei einem „miss“ wird das Phänomen nicht vorhergesagt aber beobachtet. Wenn das Ereignis weder vorhergesagt noch beobachtet wird, wird dies als „correct negative“ bezeichnet. Aus den Kontingenztafeln können verschiedene Attribute berechnet werden, die die Qualität einer Vorhersage charakterisieren. In dieser Arbeit werden die Nowcasting-Ergebnisse anhand dreier Eigenschaften verifiziert, die den Informationsgehalt der Kontingenztafeln vollständig wiedergeben (Stephenson, 2000):

- POD (Probability of detection):

$$POD = \frac{hits}{hits + misses} \quad (IV.8)$$

		Beobachtung	
		Ja	Nein
Vorhersage	Ja	hits	false alarms
	Nein	misses	correct negatives

Tabelle IV.13.: 2x2 Kontingenztafel

Das Attribut *POD* beschreibt das Verhältnis zwischen der Anzahl an korrekten Vorhersagen und der Anzahl, wie oft das Ereignis insgesamt eingetreten ist. Wenn ein System alle Ereignisse korrekt prognostiziert, hat *POD* den Wert 1 (Wilks, 2006).

- *POFD* (Probability of false detection):

$$POFD = \frac{\text{false alarms}}{\text{false alarms} + \text{correct negatives}} \quad (\text{IV.9})$$

Die Eigenschaft *POFD* ist das Verhältnis zwischen der Anzahl an fehlerhaften Vorhersagen und der Anzahl, wie oft ein Ereignis nicht eingetreten ist. Wenn ein System keine falschen Prognosen erstellt, hat *POFD* den Wert 0. Da Winterwettersituationen statistisch gesehen seltene Ereignisse sind, ist der Wert „correct negatives“ in WHITE in der Regel sehr hoch. Das Nicht-eintreffen eines Ereignisses wird nicht explizit berechnet und während unproblematischer Perioden, zum Beispiel bei wolken- oder niederschlagsfreien Bedingungen, wächst der Wert „correct negative“ automatisch an. *POFD* ist deshalb in der Regel sehr klein und liegt um eine oder zwei Größenordnungen unterhalb des Wertes von *POD* (Wilks, 2006).

- *BIAS*:

$$BIAS = \frac{\text{hits} + \text{false alarms}}{\text{hits} + \text{misses}} \quad (\text{IV.10})$$

Das Attribut *BIAS* beschreibt das Verhältnis zwischen allen Vorhersagen und allen Beobachtungen eines Ereignisses. Ist das Verhältnis ausgewogen, hat *BIAS* den Wert 1. Ist die Anzahl an Vorhersagen größer als die Anzahl an Beobachtungen, so spricht man von Overforecasting ($BIAS > 1$). Ist dagegen die Anzahl der Beobachtungen größer, so wird dies als Underforecasting bezeichnet ($BIAS < 1$) (Wilks, 2006).

WHITE berechnet und prognostiziert nicht nur ein Wetterereignis sondern differenziert zwischen unterschiedlichen Szenarien. Im Zuge der Evaluierung werden

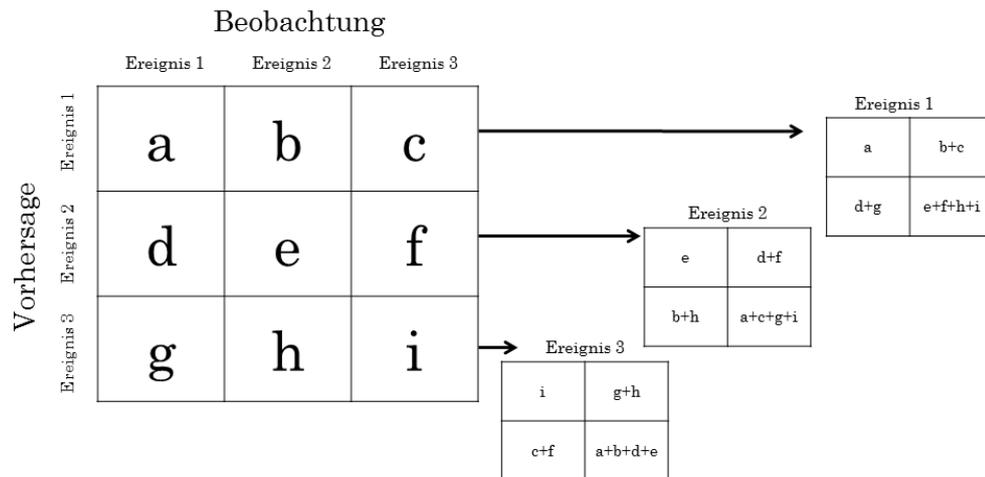


Tabelle IV.14.: Multi-Kategorie-Kontingenztafel und Ableitung von 2x2-Kontingenztafeln für jedes Ereignis. Abbildung nach Wilks (2006).

aus diesem Grund Multi-Kategorie-Kontingenztabelle erstellt. Aus diesen Tabellen lässt sich ablesen, wie oft ein bestimmtes Ereignis korrekt vorhergesagt wurde, welche Vorhersage wie oft durch eine andere Beobachtung als falsch identifiziert wurde oder wie oft eine bestimmte Beobachtung durch die Vorhersage nicht angezeigt werden konnte. Für jede Wetterklasse der Multi-Kategorie Tabellen lassen sich die 2x2-Kontingenztafeln ableiten, aus denen die oben beschriebenen Attribute berechnet werden können. Die Probleme, die dabei auftreten, werden in Kapitel V angesprochen. Anhand Tabelle IV.14 wird beispielhaft illustriert, wie eine 3x3-Multi-Kategorie-Tabelle in 2x2-Tafeln für alle Ereignisse transformiert werden kann. Dafür wird die Kategorisierung der Fehlalarme und der falsch vorhergesagten Beobachten aufgegeben.

IV.5.2.1. Beurteilung des Erfolgs des Participatory-Sensing-Ansatzes

Die primäre Intention des Participatory-Sensing-Ansatzes ist der erleichterte Kontakt mit potentiellen Nutzern und Kunden des Systems sowie das Sammeln von Beobachtungen. Wie in Kapitel IV.5.1 beschrieben, nehmen in der quasioperationalen Testphase verschiedene Nutzergruppen an der Kampagne teil. Die Abbildung IV.38 zeigt die Verwendung von WRAP und der Nowcasting-Ergebnisse von der Deutschen Flugsicherung am Flughafen München.

Alles in allem stieß der Ansatz bei den Teilnehmern auf breite Akzeptanz und das allgemeine Feedback war durchweg positiv. Abbildung IV.39 zeigt die geografische

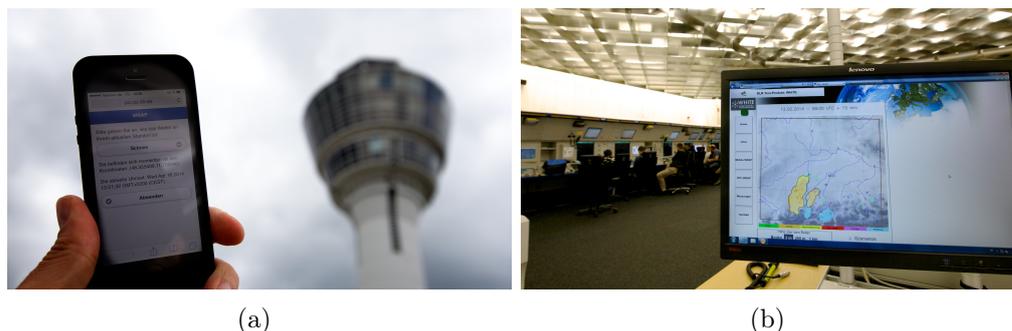


Abbildung IV.38.: Nutzung von WHITE am Flughafen München. Abbildung (a) zeigt exemplarisch die Nutzung von WRAP in der Nähe des Towers am Flughafen München. In Abbildung (b) sieht man die Darstellung der WHITE-Ergebnisse auf einem Rechner der DFS im Tower des Flughafens München. Quelle: Frank Depping, Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS), Niederlassung Süd, Flughafen München.

Verteilung der eingegangenen Meldungen während der Kampagnen 2012/2013 und 2013/2014. Es ist zu erkennen, dass die Meldungen hauptsächlich aus dem direkten Münchner Umland stammen. Dies ist nicht sonderlich verwunderlich, da alle teilnehmenden Einrichtungen dort oder am Flughafen beheimatet sind. Während der ersten Kampagne wurden insgesamt 595 Meldungen gezählt. 79 davon stammen direkt vom Flughafen. Wenn man berücksichtigt, dass es während des Winters 2012/2013 insgesamt 72 Tage gab, an denen Winterwettereinsätze nötig waren, so ist diese Zahl durchaus zufrieden stellend. Die Entscheidungsträger am Flughafen verfügen bereits über standardisierte Systeme, die sie vor Winterwetterbedingungen warnen, und besitzen vor allem im stressigen Vorfeld von kritischen Situation kaum Kapazitäten, um zusätzliche Forschungsergebnisse zu konsultieren. An Tagen, an denen die Lage in Bezug auf Winterwetter gänzlich unproblematisch ist, besteht außerdem selten das Interesse an einem Nowcasting von Winterwetter Szenarien. Dieser Umstand erklärt auch die geringe Anzahl an Meldungen während des warmen und trockenen Winters 2013/2014. Dennoch wurden immerhin 24 der 372 Meldungen aus dem direkten Umfeld des Münchner Flughafens abgeschickt. Bei lediglich 14 Tagen mit Winterwetteroperationen zeigt diese Zahl, dass trotz der für Winterwetterforschung widrigen Bedingungen das generelle Interesse an WHITE bestehen blieb. Belegt wird dies auch dadurch, dass während der Kampagne die WHITE-Internetseite insgesamt 664 mal aufgerufen wurde. Ein für die zweite Kampagne implementiertes Skript zählte die Aufrufe der Seite und speicherte sie in einer Textdatei. Dabei wurde die IP-Adresse des Nutzers nicht abgefragt, so dass dessen Anonymität vollständig gewahrt blieb. Der relativ hohe Anteil an „kein Niederschlag“ Meldungen während beider Kampagnen wird als Zeichen gewertet, dass sich viele Nutzer im Vorfeld einer Winterwittersituation über die zu erwartenden Bedingungen informieren wollten.

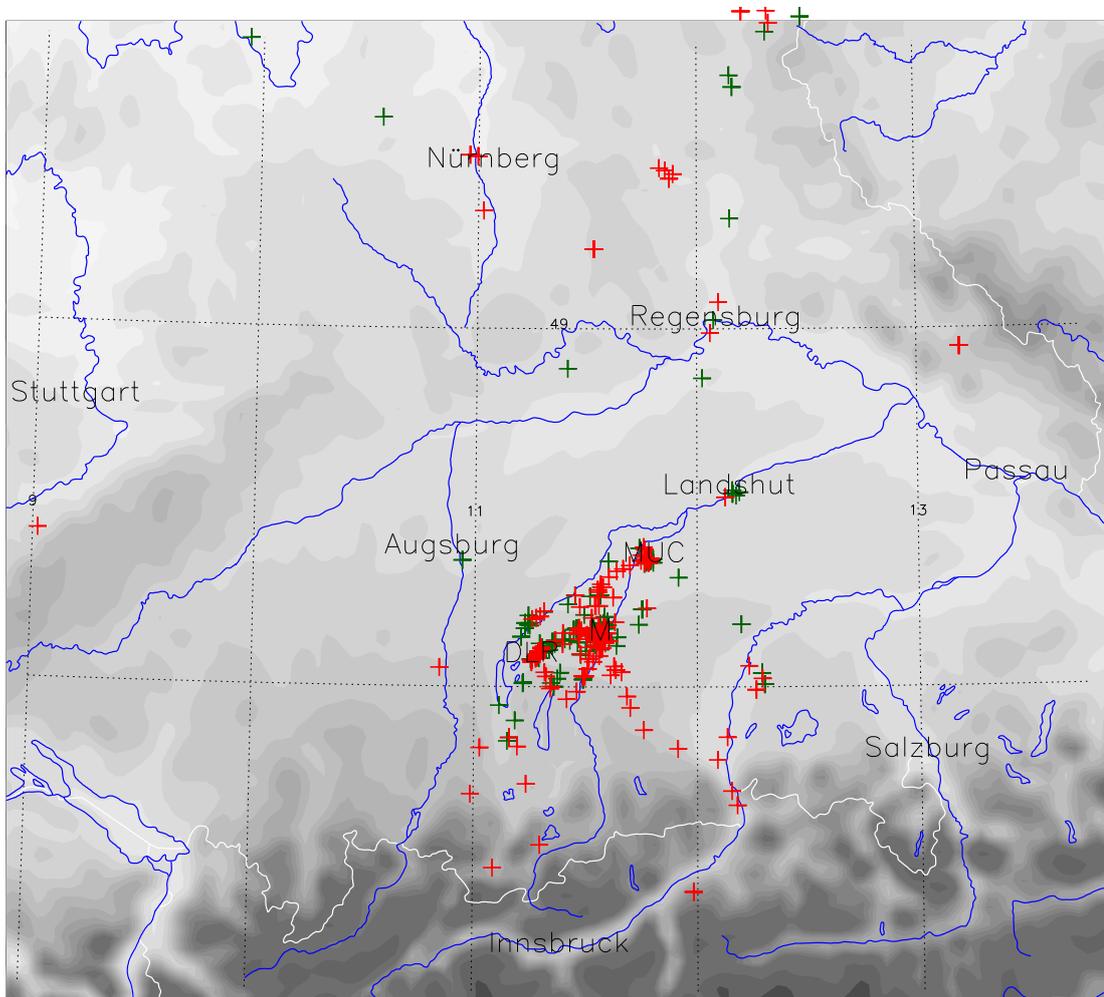


Abbildung IV.39.: *Geografische Verteilung der WRAP-Meldungen. In der Abbildung sind die Meldungen während der Kampagne 2012/2013 anhand der roten Symbole gekennzeichnet. Insgesamt wurden 595 Meldungen (258 Schnee, 30 Mischniederschlag, 37 Regen, 15 Niesel, 3 gefrierender Regen, 6 Eisregen, 1 Nebel, 245 kein Niederschlag) gezählt. Während der Kampagne 2013/2014 (grüne Symbole) wurden 372 Meldungen (69 Schnee, 46 Mischniederschlag, 26 Regen, 32 Niesel, 0 gefrierender Regen, 1 Eisregen, 20 Nebel, 178 kein Niederschlag) mit WRAP innerhalb des Untersuchungsgebiets abgesetzt.*

IV.5.2.2. Statistische Verifikation des Nowcasting-Systems

Das deterministische Vorhersage-System WHITE kann durch einen Vergleich der individuellen Wetterobjekte mit den Beobachtungen der Wetterstationen und der WRAP-Meldungen verifiziert werden. Dabei wird jeweils die Wetterbeobachtung mit der Ausgabe der untersten Modellschicht am nächstgelegenen Gitterpunkt und seiner direkten Nachbarschaft verglichen. Wetterbeobachtungen von bemannten und automatischen Stationen werden gleichberechtigt behandelt. Für die Evaluierung erfolgt eine Unterteilung in die drei Zonen Alpen, Bayern und Flughafen München (vgl. Abbildung IV.35). Sie repräsentieren die Geländeformen Hochgebirge und Mittelgebirge bzw. Schichtstufenland. Die Ergebnisse für den Flughafen München werden separat untersucht. Durch die Einteilung in Zonen können eventuell vorhandene geografisch oder topographisch induzierte Unterschiede in der Vorhersagequalität untersucht werden. WHITE ist trotz seiner Datenkombination von Profilen des numerischen Vorhersagemodells abhängig. Schmale Gebirgstäler oder -rücken können teilweise vom Modell nicht aufgelöst werden. In der Realität können sich zum Beispiel die Strömungs- und Druckverhältnisse an diesen für das Modell unsichtbaren Hindernissen ändern und die Wettersituation ist anders als vom Modell prognostiziert. Wetterstationen, die in solchen Tälern lokalisiert sind, beobachten das Wetter in der Talsohle. Wenn das Tal vom Modell nicht aufgelöst wird, berechnet WHITE aber das Wetterobjekt in der Höhe der umgebenden Gebirgsrücken. Deswegen ist zu erwarten, dass die Ergebnisse aus den flachen Zonen in direkter Proportionalität zur Modellvorhersage besser sind als die Ergebnisse aus den Gebirgszonen. Um diese Problematik zu berücksichtigen, wird die Evaluierung in jeder Zone separat durchgeführt.

In der quasioperationell getesteten Version von WHITE sind die Grenzwerte 50 und 66.66 aus Logikgründen implementiert. Einzelfallstudien haben aber gezeigt, dass andere Grenzwerte bessere Ergebnisse liefern können. Die statistische Verifikation wird deshalb nicht nur für die beiden Grenzwerte 50 (GW_{mix}) und 66.66 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{sld}) sondern auch für die alternativen Werte 33.33 (GW_{mix}) und 50 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{sld}) durchgeführt. 33.33 markiert in diesem Fall den Mittelwert zwischen dem minimalen Indikatorwert und 50. Im Folgenden wird die Verifikation für die Grenzwerte 50 und 66.66 als Version A und die Verifikation für die Grenzwerte 33.33 und 50 als Version B bezeichnet. In Anhang A sind die Multi-Kategorie-Kontingenztabellen aller Zonen und aller Nowcasting-Zeitschritte für die Kampagne 2013/2014 und für beide Versionen gezeigt. Aus diesen Tabellen lassen sich für jede Wetterklasse die oben angesprochenen Attribute berechnen. Teilweise ist aber die über den kompletten Kampagnenzeitrahmen summierte Anzahl an Beobachtungen eines Wetterereignisses in einer Region zu gering, um sinnvolle und aussagekräftige Attribute zu erhalten.

Auch die Verifikation anhand der mit WRAP im Winter 2013/2014 gesammelten Daten ist in Anhang A für die Analysezeitpunkte gezeigt. Da Meldungen weder über gefrierenden Regen noch über Vereisung eingingen und Graupel nur ein einziges Mal gemeldet wurde, können ausschließlich für die Beobachtungen von Schnee und Mischniederschlag sinnvolle Verifikationsattribute berechnet werden. Bei der Version A kann für *Schnee* ein POD-Wert von 0.51, ein POFD-Wert von 0.02 und ein BIAS-Wert von 0.58 berechnet werden. Für *Mischniederschlag* beträgt der POD-Wert 0.54, der POFD-Wert 0.07 und der BIAS-Wert 1.04. Wenn die beiden manchmal schwer auseinanderzuhaltenden Wetterklassen zusammengefasst betrachtet werden, ergeben sich Werte von 0.70 (POD), 0.03 (POFD) und 0.77 (BIAS). Auf dieser Datengrundlage ist also ein generelles dominierendes Underforecasting für *Schnee* und ein minimales Overforecasting für *Mischniederschlag* zu erwarten. Bei Berechnung derselben Attribute in Version B ergeben sich die Werte 0.75 (POD), 0.09 (POFD) und 1.13 (BIAS) für *Schnee* sowie 0.61 (POD), 0.15 (POFD) und 1.69 (BIAS) für *Mischniederschlag*. Die Kombination beider Klassen liefert die Werte 0.96 (POD), 0.18 (POFD) und 1.35 (BIAS). In dieser Version sind sowohl die POD-Werte als auch die POFD-Werte erhöht und es ist für alle Klassen ein leichtes Overforecasting zu beobachten. Da dieses aber noch in einem akzeptablen Rahmen liegt, deutet die Verifikation anhand der WRAP-Meldungen an, dass die Verwendung kleinerer Grenzwerte bessere Resultate liefert.

Im Winter 2013/2014 waren Winterwettersituationen im Vergleich zur totalen Anzahl an Wetterbeobachtungen statistisch gesehen ein sehr seltenes Ereignis. Daher sind die POFD-Werte aller Klassen generell sehr gering, da bei deren Berechnung die Anzahl der korrekt nicht klassifizierten Beobachtungspixel berücksichtigt werden muss. In der Region I Alpen beispielsweise schwanken die POFD-Werte der Klasse *Schnee* zwischen 0.02 und 0.04 für die jeweiligen Nowcasting-Zeiten. Die POD-Werte liegen im Bereich von 0.48 bis 0.50, die BIAS-Werte im Bereich von 1.01 für die Analysezeitpunkte und 1.50 für die Nowcasting-Zeitschritte. Wenn davon ausgegangen wird, dass alle Eiskörper-Meldungen in WHITE durch die Klassen *Mischniederschlag* bzw. *Schnee* abgedeckt wurden, ergeben sich für die Kombination die POD-Werte 0.52 bis 0.54, die POFD-Werte 0.02 bis 0.04 und die BIAS-Werte 1.17 bis 1.68. Bei der Verifikation mit den Klassifikationsgrenzwerten der Version B ergeben sich für *Schnee* POD-Werte zwischen 0.50 und 0.52, POFD-Werte um 0.05 und BIAS-Werte zwischen 1.98 und 2.09. Die kombinierte Klasse *Schnee-Mischniederschlag-Eiskörper* würde die Verifikationseigenschaft POD mit 0.57 bis 0.59, die Eigenschaft POFD mit etwa 0.10 und die Eigenschaft BIAS mit etw 3.16 berechnen. Das bereits in Version A erkennbare leichte Overforecasting ist in Version B deutlich ausgeprägter. Eine Verwendung kleinerer Grenzwerte scheint in diesem Fall wenig sinnvoll, da auch die POD-Werte nicht signifikant verbessert werden können. Die 19 Meldungen gefrierender Niederschlag aus dieser Region werden in Version A maximal sechs mal richtig erkannt bzw. vorhergesagt. In Version B werden immerhin maximalelf der Beobachtungen auch vom WHITE-System bestätigt. Die Verifikationseigenschaften schwanken aufgrund der geringen Anzahl

an Beobachtungen in ihren Werten sehr stark. Im Hinblick auf die gefrierenden Niederschläge, aber auch im Hinblick auf Mischniederschlag, Eiskörner und Vereisung in allen drei Verifikationsregionen soll an dieser Stelle auf das Kapitel V verwiesen werden, in dem diverse Aspekte und Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Verifikation angesprochen werden. Die Erkennung bzw. Vorhersage von unproblematischen Situationen (Beobachtung kein Niederschlag bzw. Regen und kein WHITE-Objekt am Gitterpunkt) funktionierte mit POD-Werten von ca. 0.95 und BIAS-Werten von ca. 0.96 in der Version A bzw. 0.85 (POD) und 0.87 (BIAS) in der Version B.

In der Region II Bayern werden für *Schnee* Werte um 0.4 (POD), 0.01 (POFD) und 0.9 bis 1.3 (BIAS) in der Version A sowie 0.5 (POD), 0.02 (POFD) und 2.23 (BIAS) in der Version B ermittelt. Eine kombinierte Verifikation der WHITE-Klassen *Schnee*, *Mischniederschlag* und *Eiskörner* mit den entsprechenden Beobachtungen ergibt Werte zwischen 0.52 und 0.57 (POD), 0.01 und 0.02 (POFD) sowie 1.36 und 1.96 (BIAS) in der Version A. Version B resultiert in 0.68 bis 0.69 (POD), 0.06 bis 0.07 (POFD) und 5.67 bis 5.8 (BIAS). Sowohl für *Schnee* als auch für die kombinierte Verifikation ist bei Verwendung von Version B ein ausgeprägtes Overforecasting zu erkennen. In Version A ist dagegen zumindest für *Schnee* teilweise ein Underforecasting zu verzeichnen. Die POD-Werte für unproblematische Situationen ohne Winterwetter liegen bei etwa 0.98 (Version A) bzw. 0.90 (Version B), während die BIAS-Werte in etwa 0.99 (Version A) und 0.92 (Version B) betragen.

In der direkten Umgebung des Flughafens München (Verifikationsregion III MUC) ergeben sich für *Schnee* in der Verifikationsversion A POD-Werte für Analyse- und Nowcasting-Zeitschritte um 0.38, POFD-Werte um 0.004 und BIAS-Werte zwischen 0.91 und 1.37. Auch hier ist für die Analyse-Zeitpunkte ein leichtes Underforecasting und für die Nowcasting-Zeitschritte ein leichtes Overforecasting zu registrieren. Durch die Verifikation unter Verwendung der Version B berechnen sich POD-Werte um 0.55 und POFD-Werte um 0.02. Die BIAS-Werte mit ca. 2.9 sind in dieser Version auch für die Analyse-Zeitpunkte deutlich größer als 1 und ein generelles Overforecasting muss verzeichnet werden. Eine ähnliche Aussage gilt für die kombinierte Verifikation von *Schnee*, *Mischniederschlag* und *Eiskörnern*. Das Overforecasting ist mit BIAS-Werten zwischen 1.75 und 2.49 allerdings bereits in Version A deutlich. Version B ergibt jeweils nochmals deutlich erhöhte Werte. Die POD-Werte der Version A schwanken zwischen 0.66 (Analyse) und 0.46 (Nowcasting), die POFD-Werte betragen ca. 0.02. In der Version B liegen die Werte bei ca. 0.75 (POD) bzw. 0.07 (POFD). Bei Betrachtung der unproblematischen Situationen können POD-Werte von 0.99 (Version A) bzw. 0.92 (Version B) sowie BIAS-Werte von 1.00 (Version A) bzw. 0.94 (Version B) verzeichnet werden. Die Unterschiede in den Eigenschaften der einzelnen Regionen sind nicht sehr ausgeprägt. Der Verdacht, dass die Topographie Einfluss auf die Qualität der WHITE-Vorhersagen hat, bestätigt sich nicht. Sowohl für die Alpenregion als auch für das

hügelige bzw. flache restliche Bayern und östliche Baden-Württemberg konnten ähnliche Verifikationsergebnisse berechnet werden.

Aufgrund kontinuierlicher Anpassung der Algorithmen während der Kampagne kann die Version von WHITE, die in den Wintermonaten 2012/2013 lief, nicht als einheitliches System angesehen werden. Für die Verifikation wurden die gesammelten Daten ab dem 21.02.2013 anhand der verbesserten Algorithmen der aktuellen Version unter Verwendung der Klassifikationsversion A postprozessiert, um die Daten aus 2013/2014 unter Verwendung der Ergebnisse der ersten Kampagne zu erweitern und um einheitliche Qualitätsaussagen zu ermöglichen. Im Winter 2012/2013 lag der maximale Vorhersagezeitraum von WHITE bei 60 Minuten. Die Erweiterung auf 120 Minuten wurde erst für die aktuelle Version der zweiten Testkampagne implementiert. In den Multi-Kategorie-Kontingenztabellen sind deshalb nur Auswertungen für die Analysezeitpunkte, für das 15-Minuten-, das 30-Minuten- und das 60-Minuten-Nowcasting zu finden. In der Region I Alpen liegen die POD-Werte für die Klasse *Schnee* um 0.3, die POFD-Werte um 0.03 und die BIAS-Werte um 0.5. Ein ausgeprägtes Underforecasting muss hier registriert werden. Da die Anzahl an Beobachtungen von gemischtem Niederschlag und Eiskörner sehr gering ist, variieren die Werte für die zusammengefasste Verifikation nur unwesentlich. Für die unproblematischen Situationen ohne Winterwetter können hier die Werte 0.91 (POD) und 1.02 (BIAS) berechnet werden.

Für die Klasse *Schnee* können in der Region II Bayern POD-Werte zwischen 0.45 und 0.48 berechnet werden. Die POFD-Werten liegen bei etwa 0.02, die BIAS-Werte bei 0.58. Ähnliche Werte ergeben sich bei Betrachtung der kombinierten Verifikation von *Schnee*, *Mischniederschlag* und *Eiskörnern*. Die POD-Werte schwanken zwischen 0.48 und 0.50, während sich die POFD-Werte zu ca. 0.03 berechnen. Die BIAS-Werte liegen hier bei 0.63. Auch in dieser Region liegt also ein generelles Underforecasting vor, auch wenn die Werte deutlich besser sind als die Werte aus Region I. In diesem Fall kann also im Gegensatz zur Kampagne 2013/2014 ein Qualitätsunterschied zwischen Hochgebirge und Flachland ausgemacht werden. Bei Betrachtung der unproblematischen Situationen können POD-Werte um 0.92 und BIAS-Werte um 1.03 registriert werden.

In der Verifikationsregion III MUC können für *Schnee* POD-Werte um 0.74, für *Mischniederschlag* POD-Werte um 0.79 und für die Kombination aus *Schnee*, *Mischniederschlag* und *Eiskörnern* POD-Werte um 0.83 berechnet werden. Die POFD-Werte liegen bei 0.03 (*Schnee*), 0.01 (*Mischniederschlag*) und 0.03 (Kombination). Die Untersuchung der BIAS-Werte liefert ein Underforecasting für *Schnee* (BIAS-Werte zwischen 0.82 und 0.86) und ein Overforecasting für *Mischniederschlag* (BIAS-Werte zwischen 1.19 und 2.14). Für die Kombination kann das Underforecasting mit BIAS-Werten zwischen 0.86 und 0.97 minimiert werden. Die Erkennung bzw. Vorhersage von unproblematischen Situationen funktionierte mit POD-Werten von ca. 0.94 und BIAS-Werten von ca. 0.98.

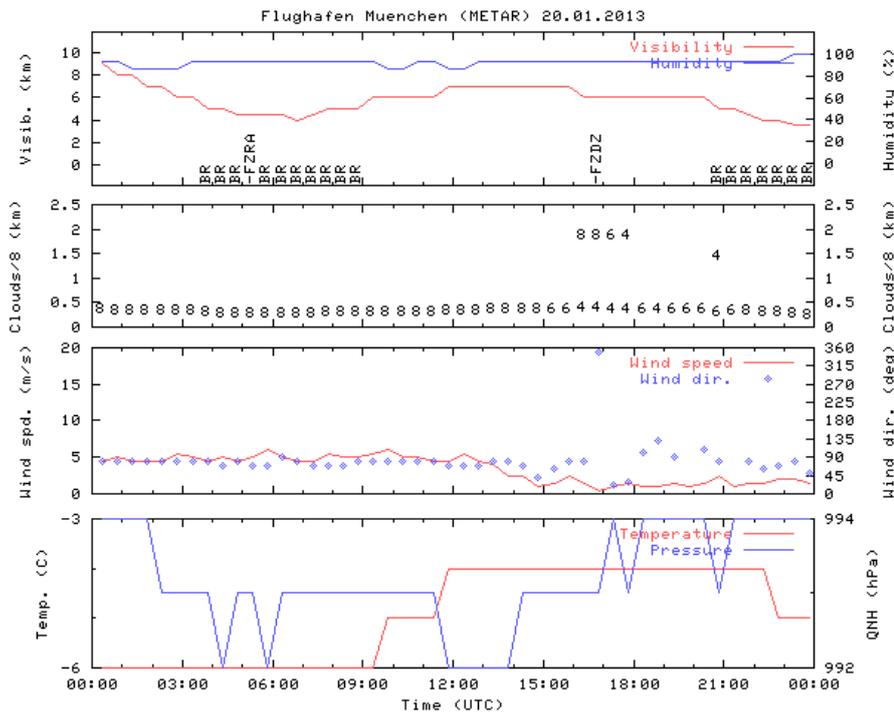


Abbildung IV.40.: METAR Meldungen am Flughafen München vom 20.01.2013

IV.5.2.3. Fallstudien von WHITE

Neben der statistischen Verifikation wird für WHITE eine erste Evaluierung anhand ausgewählter Winterwetterlagen durchgeführt. Dies soll zum einen die Funktionsweise und die Leistungsfähigkeit des Systems demonstrieren und zum anderen zeigen, dass WHITE kritische Situationen korrekt, illustrativ und leicht verständlich vorherzusagen vermag. In diesem Kapitel werden zunächst die wesentlichen Merkmale der ausgewählten Wetterlagen erläutert und anschließend repräsentative Ergebnisse des WHITE-Nowcasting-Systems gezeigt und beschrieben.

Wetterlage vom 20.01.2013 Große Teile Deutschlands hatten am Wochenende vom 19. und 20. Januar 2013 mit den Folgen von gefrierenden Niederschlägen zu kämpfen. Laut einer Meldung der dpa (Deutsche Presse-Agentur) vom 21.01.2013 musste am Flughafen Frankfurt der Flugbetrieb ab ca. 15:40 UTC für mehrere Stunden eingestellt werden, da ein Enteisen der Maschinen nicht länger möglich war. Im Laufe des Tages mussten insgesamt rund 400 Flüge annulliert werden. Auch für den Flughafen München wurde vom DWD für den Zeitraum 15:30 UTC bis 18:00 UTC eine Flughafenwetterwarnung aufgrund gefrierender Niederschläge ausgegeben. Tatsächlich wurde lediglich gegen 17:00 UTC leichter gefrierender Niederschlag beobachtet (vgl. METAR Meldung FZDZ um 16:50 UTC in Abbildung

IV.40), der keine signifikanten Beeinträchtigungen des Betriebsablaufs mit sich brachte. Das Fallbeispiel illustriert dennoch die Funktionsweise der Wetterklasse *gefrierender Niederschlag* des WHITE-Nowcasting-Systems anschaulich und zeigt, dass diese potentiell gefährliche Situation zeitlich und räumlich korrekt vorhergesagt werden konnte.

Ursache für die gefrierenden Niederschläge war das Tiefdruckgebiet Gong. Mit dessen Warmfront gelangte warme Luft aus Spanien nach Deutschland. Die Warmluftadvektion setzte sich allerdings nicht bis in bodennahe Luftschichten durch. In Bodennähe dominierte eine nordöstliche kontinentale Kaltluftströmung, die von einem stabilen Hochdruckgebiet über Skandinavien angetrieben wurde. Am Nachmittag des 20. Januars 2013 betrug die Temperatur in einigen hochgelegenen Alpentälern bis zu 5 °C, während in der vorherrschenden bodennahen Kaltluft noch Temperaturen von bis zu -5 °C gemessen wurden. In direkter Alpennähe schmolz der in den oberen Luftschichten als Schnee gebildete Niederschlag nicht nur in der eingelagerten Warmluft, sondern verdunstete teilweise oder komplett in den bodennahen trockenen Luftschichten. Am Boden konnte in diesen Gebieten kein Niederschlag beobachtet werden, obwohl im Precipitation-Scan Reflektivität gemessen wurde.

Die Abbildung IV.41 zeigt die atmosphärische Situation um 16:30 UTC im Untersuchungsgebiet für den Analysezeitpunkt und für die Nowcasting-Zeitpunkte 16:30 UTC +15min, 16:30 UTC +30min und 16:30 UTC +60min. Die Farben und Schattierungen entsprechen der in Abbildung IV.27 gezeigten Legende. Dargestellt ist die Modellschicht in 2 m Höhe über dem Erdboden.

Quer durch Südbayern verlief zum Analysezeitpunkt um 16:30 UTC eine deutliche Luftmassengrenze. Aus Südwesten strömte warme Luft ins Untersuchungsgebiet. Ihr Aufsteigen an der vorherrschenden Kaltluft führte zur Ausbildung einer ausgeprägten Warmfront. An dieser Warmfront schmolz oder verdunstete der in hohen Luftschichten gebildete feste Niederschlag in der eingelagerten Warmluft und unterkühlte in der am Boden aufliegenden kalten Luftschicht (vgl. Vertikalprofil in Abbildung IV.42(a)). Die Analyse von WHITE berechnet für 16:30 UTC in Bodennähe kein Winterwetterszenario für den Flughafen. Die 15-Minuten-Vorhersage sowie die 30-Minuten-Vorhersage gibt für den Flughafen das Wetterobjekt *gefrierender Regen* aus. Die 60-Minuten-Vorhersage prognostiziert wiederum eine unproblematische Wettersituation. Ein Vergleich mit der Originalmessung des Precipitation-Scans (grüne Flächen in Abbildung IV.41) belegt, dass WHITE in der Lage ist, unproblematische Regionen ohne Niederschlag zu identifizieren. Die Radarmessung allein würde in diesem Fall keine ausreichende Situationsbeurteilung ermöglichen. Die Wetterobjekte von WHITE (in der Abbildung IV.41 durch rote Flächen bzw. schwarze Konturlinien gekennzeichnet) hingegen liefern eine Vorhersage, die mit den Beobachtungen in den METAR-Meldungen konsistent sind. Der leichte kurzfristige gefrierende Niederschlag gegen 17:00 UTC wird korrekt prognostiziert. Dies ist auch im vereinfachten logarithmischen Skew-T-Diagramm

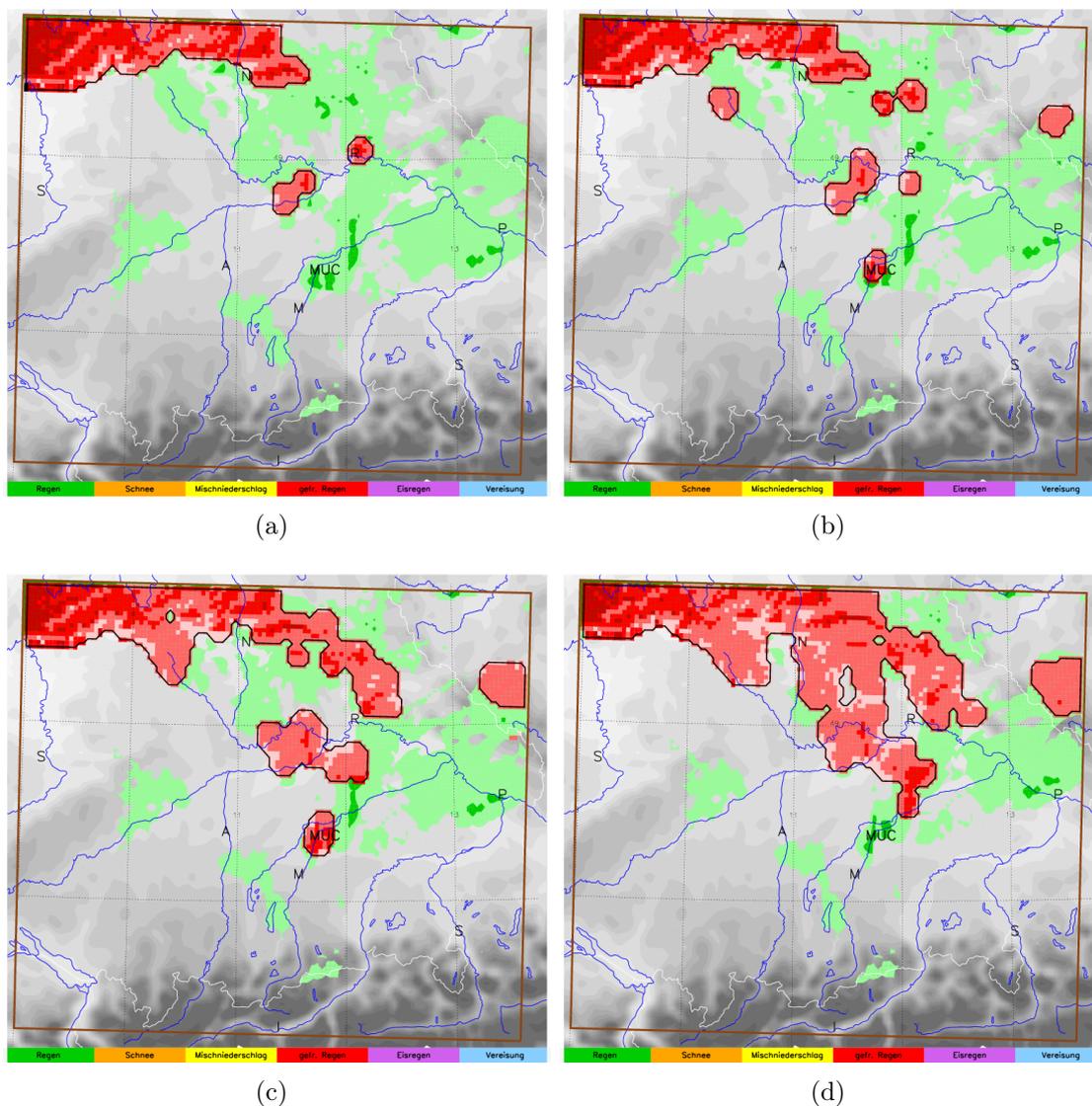
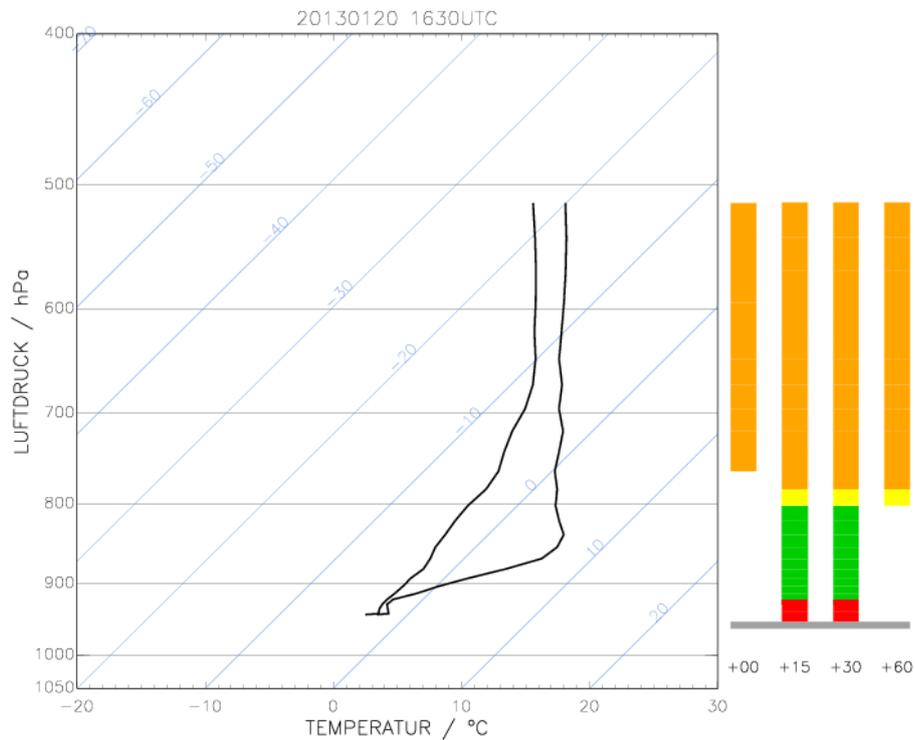
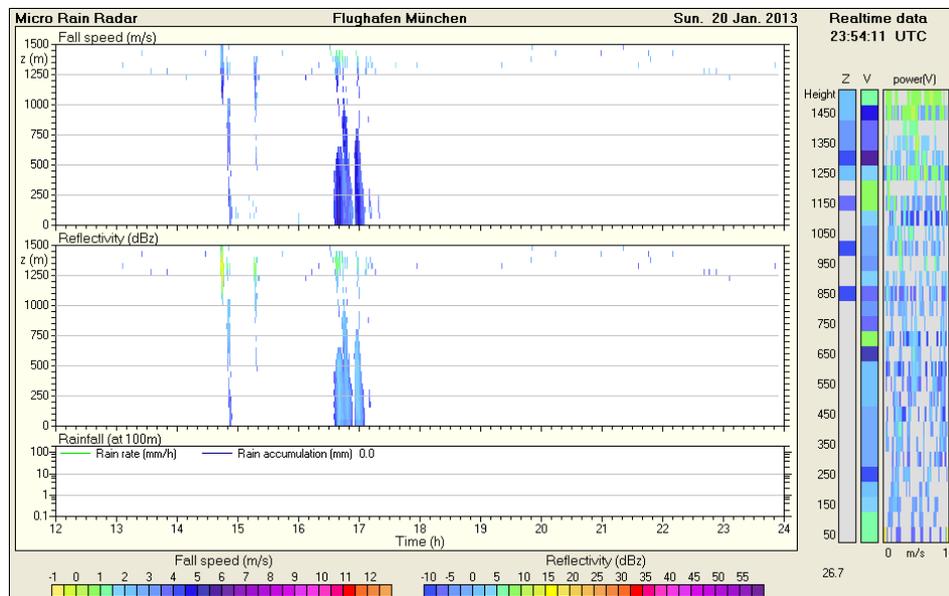


Abbildung IV.41.: Darstellung der WHITE-Winterwetterobjekte für den 20.01.2013, 16:30 UTC in der bodennahen Modellschicht (2m über dem Boden) im Untersuchungsgebiets. Farben und Schattierungen entsprechen der Legende aus Abbildung IV.27. Grüne Flächen sind die unbearbeiteten Messungen des Precipitation-Scans. WHITE-Objekte sind durch schwarze Konturlinien umrandet. (a) zeigt die Situation zum Analysezeitunkt 16:30 UTC, (b) ist das Nowcasting +15min, (c) das Nowcasting +30min und (d) das Nowcasting für +60min.

IV. Das WHITE-System



(a)



(b)

Abbildung IV.42.: (a) Temperatur und Feuchteprofil des 20.01.2013, 16:30 UTC für den Flughafen München dargestellt in einem vereinfachten Skew-T-Diagramm. Die farbigen Balken symbolisieren die WHITE-Objekte in der vertikalen Luftsäule über dem Flughafen zum angegebenen Zeitpunkt. (b) Messung des Mikro-Regen-Radars am Flughafen München am 20.01.2013.

in Abbildung IV.42(a) gut zu erkennen. Das vertikale Temperatur- und Feuchteprofil für den Flughafen München ist dort anhand der schwarzen Linien für den Analysezeitpunkt 16:30 UTC dargestellt. Zusätzlich sind dort die Ergebnisse des WHITE-Algorithmus anhand farbiger Balken illustriert. Zum Analysezeitpunkt verdunstet *Schnee* (orange Balken) aus den hohen Luftschichten bei ca. 800 hPa vollständig. Am Boden kann kein Niederschlag beobachtet werden. Zu den Vorhersagezeitpunkten von +15min und +30min erfährt der feste Niederschlag eine Phasenumwandlung zu flüssig mit dem Zwischenschritt der *Mischphase* (gelbe Balken). Eine vollständige Verdunstung wird hier nicht erwartet. Innerhalb der Warmluftschicht ist der Niederschlag flüssig und warm (grüne Balken), ehe er in der kalten Luftschicht, ohne eine erneute Phasenumwandlung zu durchlaufen, unterkühlt wird. Er erreicht letztendlich als *gefrierender Regen* (rote Balken) den Boden. Für den Vorhersagezeitraum von 60 Minuten wird die Situation ähnlich wie zum Analysezeitpunkt bewertet. Fester Niederschlag aus hohen Luftschichten verdunstet in der warmen und trockenen Schicht bei ca. 800 hPa vollständig und erreicht den Boden nicht.

Die Abbildung IV.42(b) zeigt die Messungen des Mikro-Regen-Radars. Auch von diesem Messgerät wird der kurzfristige Niederschlag gegen 17:00 UTC registriert. Das MRR des DLR-Instituts für Physik der Atmosphäre am Flughafen München misst nur bis zu einer Höhe von 1500 m. Diese maximale Reichweite liegt unterhalb der Schmelzschicht dieses Fallsbeispiels. Deshalb besitzt der registrierte Niederschlag gegen 17:00 UTC eine relativ hohe Fallgeschwindigkeit von etwa 5 m/s, was in der Regel auf flüssigen Niederschlag schließen lässt.

Bei Betrachtung der Abbildung IV.41 stechen vor allem die ausgedehnten gefrierenden Regengebiete im nördlichen Mittelfranken und der westlichen Oberpfalz ins Auge. Diese Gebiete können auch in den Wetterbeobachtungen der SYNOP und METAR Stationen gefunden werden. Am Flughafen Nürnberg, lokalisiert im Norden des Stadtzentrums, wurde sowohl um 16:20 UTC als auch um 16:50 UTC, um 17:20 UTC und um 17:50 UTC leichter gefrierender Regen beobachtet. Auch von der Wetterstation Nürnberg, die ebenfalls am Flughafen beheimatet ist, wurde um 16:00 UTC, um 17:00 UTC und um 18:00 UTC gefrierender Regen gemeldet. An der Wetterstation in Regensburg wird um 17:00 UTC und um 18:00 UTC gefrierender Niesel registriert. Um 16:00 UTC wurde von dort noch bedeckter Himmel ohne Niederschlag gemeldet. Dies deckt sich relativ gut mit den analysierten und prognostizierten WHITE-Objekten. Auch die Abgrenzung der Objekte nach Süden lässt sich anhand von Beobachtungen nachvollziehen. So wurde beispielsweise am Heeresflugplatz Niederstetten (ca. 85 km südwestlich von Nürnberg im nordöstlichen Baden-Württemberg) sowohl um 16:20 UTC, als auch um 17:20 UTC und 18:20 UTC lediglich feuchter Dunst gemeldet. Auch am Militärflugplatz Neunburg an der Donau (ca. 45 km nordöstlich von Augsburg) wird zu denselben Zeiten kein signifikantes Wetter gemeldet. Die Wetterstation Straubing meldete um 16:00 UTC und 17:00 UTC jeweils Nebel, bevor dort um 18:00 UTC gefrierender Niesel

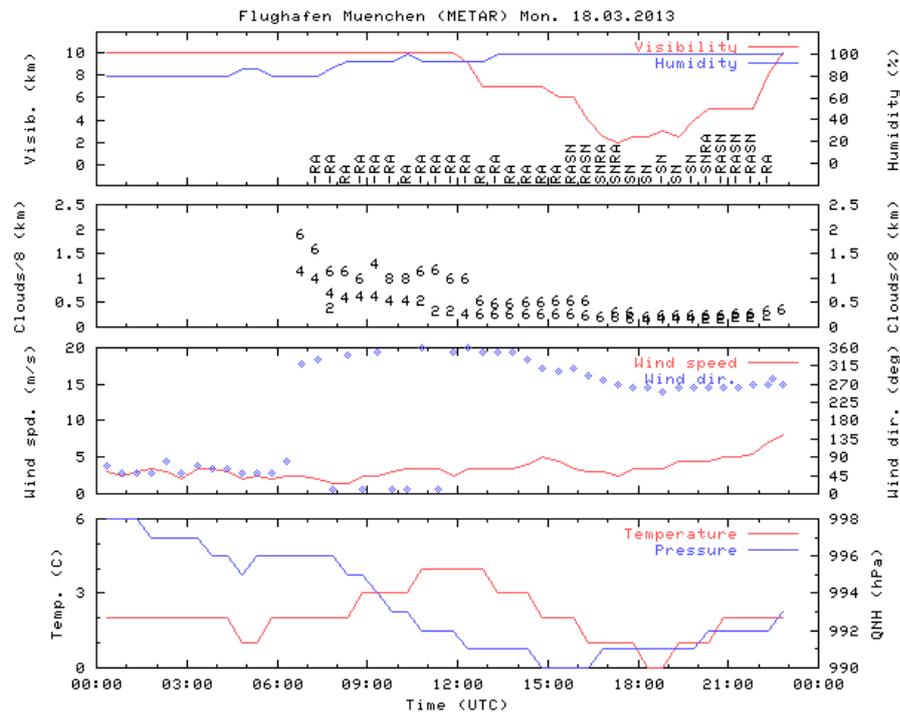
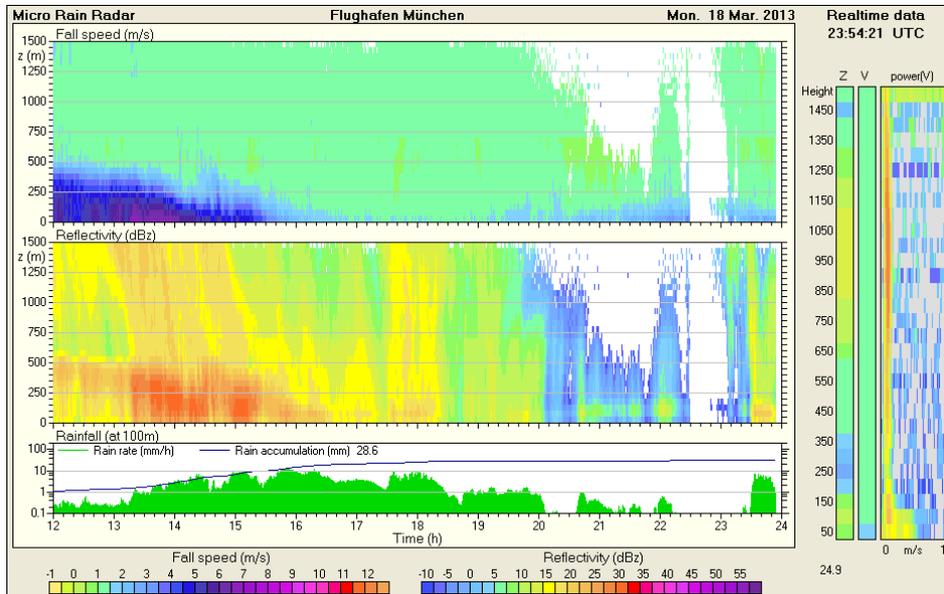


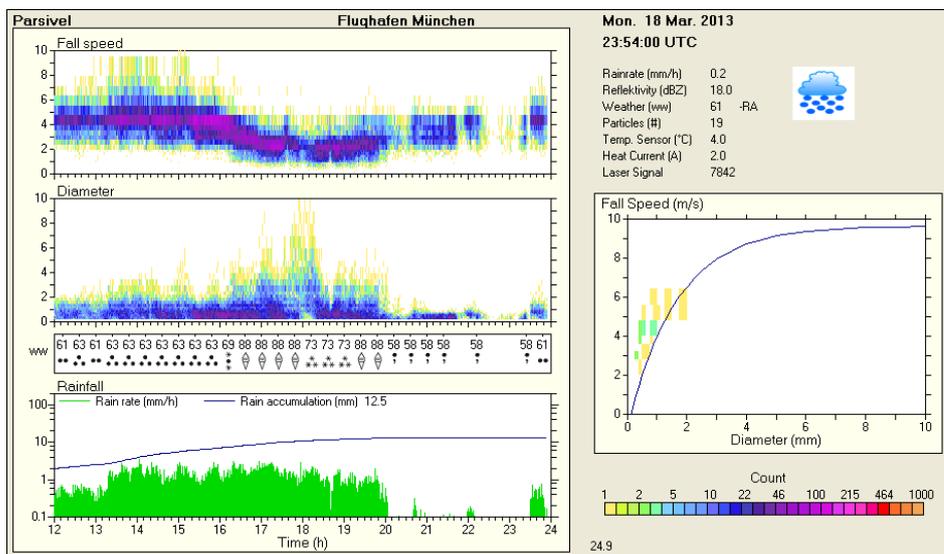
Abbildung IV.43.: METAR Meldungen am Flughafen München vom 18.03.2013

registriert wurde. Am Großen Arber im Bayerischen Wald wurde um 17:00 UTC leichter Regen gemeldet. Der Große Arber liegt innerhalb des Gebiets, das das WHITE-Nowcasting 16:30 UTC +30 min als unklassifizierte Radarreflektivitätspixel ausgibt (grüne Fläche in Abbildung IV.41(c)). Das Nowcasting von WHITE trifft also auch in diesem Falle zu. Selbstverständlich existieren auch in diesem Fallbeispiel Meldungen von Stationen, die nicht mit den Objekten übereinstimmen und die an dieser Stelle erwähnt werden müssen. So wurde beispielsweise an der Station Fürstencell (ca. 15 km südwestlich von Passau) um 17:00 UTC und um 18:00 UTC gefrierender Regen gemeldet. WHITE hatte für diese Region keine Objekte erstellt. Dennoch erfasst und prognostiziert WHITE die Situation in diesem Fallbeispiel im Großen und Ganzen korrekt. Die in Kapitel IV.5.2.2 erwähnte Anpassung der Klassifikationsgrenzwerte kann bereits verbesserte Ergebnisse mit sich bringen, so dass auch für das südöstliche Niederbayern ein Wetterobjekt ausgegeben wird.

Wetterlage vom 18.03.2013 Die Okklusion eines Tiefdruckgebiets mit Zentrum über dem Golf von Genua war bestimmend für die Wetterlage vom 18.03.2013. Sie erstreckte sich vom Allgäu bis nach Franken und zog langsam ostwärts. Aus Westen gelangte sehr feuchte und nach und nach auch kältere Luft ins Untersuchungsgebiet. Aus der frontalen Schichtbewölkung konnte immer wieder leichter bis mäßiger Regen beobachtet werden. Am Nachmittag gegen 16:00 UTC ging dieser am Flug-



(a)



(b)

Abbildung IV.44.: Messungen des Mikro-Regen-Radars (a) und des Parsivel Disdrometers (b) am Flughafen München am 18.03.2013

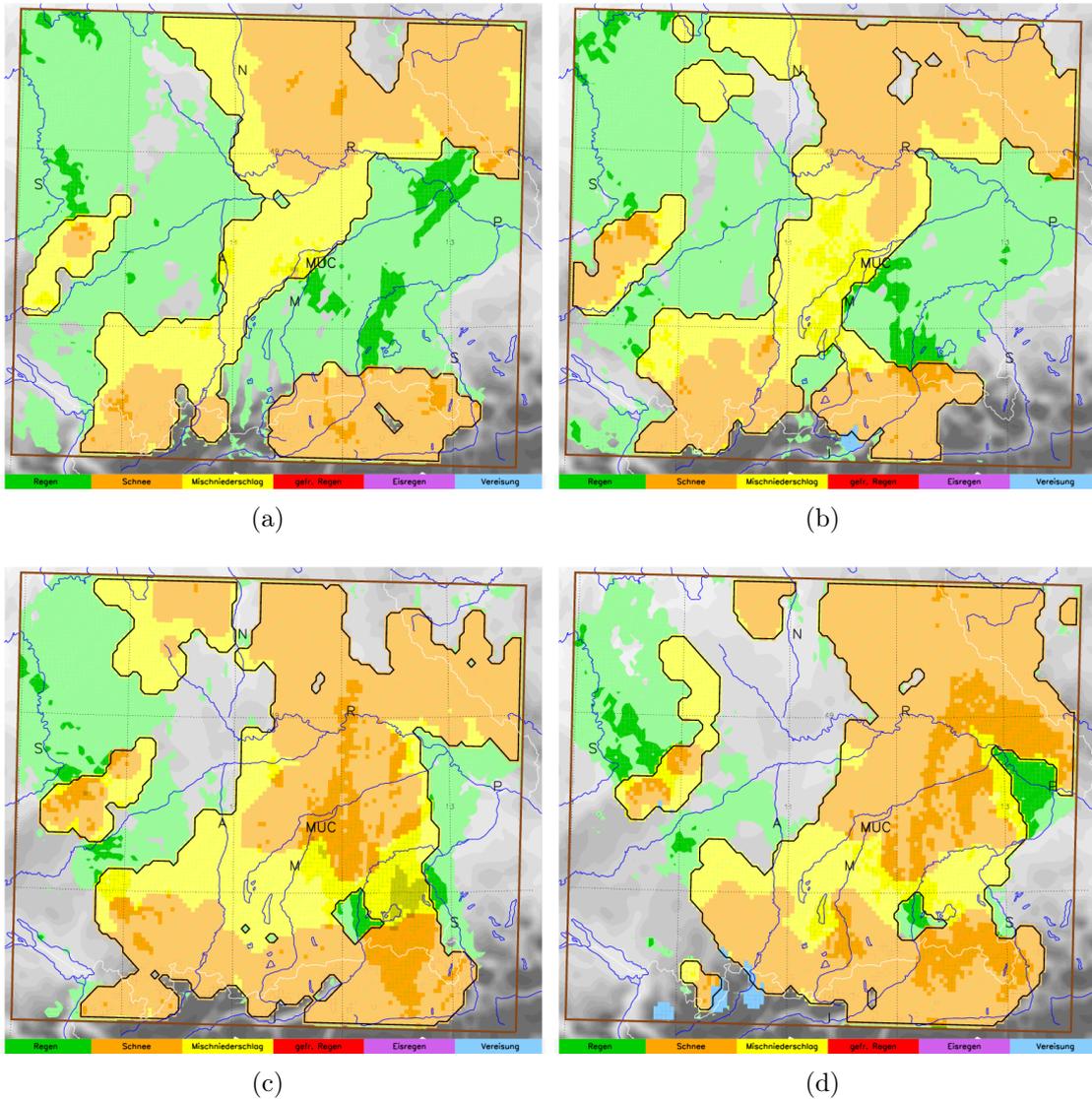


Abbildung IV.45.: Darstellung der WHITE-Winterwetterobjekte für den 18.03.2013, 16:00 UTC (a), 17:00 UTC (b), 18:00 UTC (c) und 19:00 UTC (d) in der bodennahen Modellschicht (2 m über dem Boden) als Horizontalschnitt des Untersuchungsgebiets. Farben und Schattierungen entsprechen der Legende aus Abbildung IV.27. Grüne Flächen sind die unbearbeiteten Messungen des Precipitation-Scans. WHITE-Objekte sind durch schwarze Konturlinien umrandet. Es ist jeweils die Situation zum Analysezeitpunkt gezeigt.

hafen München in Mischniederschlag und gegen 18:00 UTC in Schnee über. Gegen 20:00 UTC stieg die Temperatur von 0 °C auf etwa 2 °C und der Niederschlag wurde in den METAR-Meldungen ab 20:20 UTC (vgl. Abbildung IV.43) wieder als Mischniederschlag klassifiziert. Die Abbildungen IV.44(a) und IV.44(b) zeigen die Messungen des Mikro-Regen-Radars bzw. des Parsivel Disdrometers für den 18.03.2013 am Flughafen München. In Abbildung IV.44(a) ist sowohl in der zeitlichen Darstellung der gemessenen Fallgeschwindigkeiten als auch in den Reflektivitäten zu erkennen, dass am frühen Nachmittag Regen registriert wurde. Schneeflocken aus den oberen Luftschichten mit Fallgeschwindigkeiten um 1 m/s schmelzen zwischen 250 m und 500 m über dem Boden zu Tropfen. Die Tropfen fallen mit einer wesentlich höheren Geschwindigkeit von etwa 5-8 m/s zu Boden. Zwischen 15:00 UTC und 17:00 UTC sank diese Schmelzschicht ab, so dass zwischen 17:00 UTC und 20:00 UTC einheitliche Fallgeschwindigkeiten und Reflektivität bis zum Boden registriert wurden. Das ist ein eindeutiges Indiz für Scheefall. Bestätigt wurde die Messung des MRR durch die Messungen des Parsivel Disdrometers, gezeigt in Abbildung IV.44(b). Dort wurde am frühen Nachmittag zunächst eine mittlere Fallgeschwindigkeit der registrierten Hydrometeore von ca. 5 m/s ausgegeben. Die durchschnittliche Größe der Hydrometeore betrug etwa 1 mm. Am späten Nachmittag wurden dagegen deutlich langsamere (ca. 2 m/s) und größere (bis zu 10 mm) Partikel registriert. Der interne Algorithmus des Parsivel Disdrometers klassifizierte die Partikel zunächst als Regen, dann als Mischniederschlag und letztendlich als Schnee.

Die Abbildung IV.45 zeigt die atmosphärische Situation im Untersuchungsgebiet für die Analysezeitpunkte um 16:00 UTC, 17:00 UTC, 18:00 UTC und 19:00 UTC. Die Farben und Schattierungen entsprechen wieder der in Abbildung IV.27 gezeigten Legende. Dargestellt ist auch hier wieder die Situation in 2 m Höhe über dem Erdboden. Es ist zu erkennen, dass WHITE die Situation für den Flughafen München korrekt erfasst. Um 16:00 UTC verläuft die Grenze zwischen Regen und Mischniederschlag in unmittelbarer Nähe zum Standort des Flughafens. Ein Blick auf die Vertikalprofile und das Nowcasting für den entsprechenden Gitterpunkt (vgl. Abbildung IV.46) offenbart, dass die Schmelzschicht von WHITE in wenigen Metern über dem Boden festgelegt wird. Innerhalb der nächsten Stunde ist demnach mit einem Absinken der Schmelzschicht und dem Übergang von Regen (grüne Balken) zu *Mischniederschlag* (gelbe Balken) in Bodennähe zu rechnen. Der Übergang des Niederschlags von *Schnee* (orange Balken) zu *Mischniederschlag* erfolgt jeweils bei ca. 900 hPa. Um 17:00 UTC wird für den Flughafen *Mischniederschlag*, um 18:00 UTC und um 19:00 UTC jeweils *Schnee* berechnet. Dies deckt sich jeweils mit den Beobachtungen der METAR-Meldungen und den Messungen von MRR und Parsivel.

Auch durch einen Vergleich mit Meldungen aus dem restlichen Untersuchungsgebiet lassen sich die WHITE-Wetterobjekte zu großen Teilen bestätigen. So wurde beispielsweise um 16:00 UTC in Nürnberg und Augsburg Mischniederschlag be-

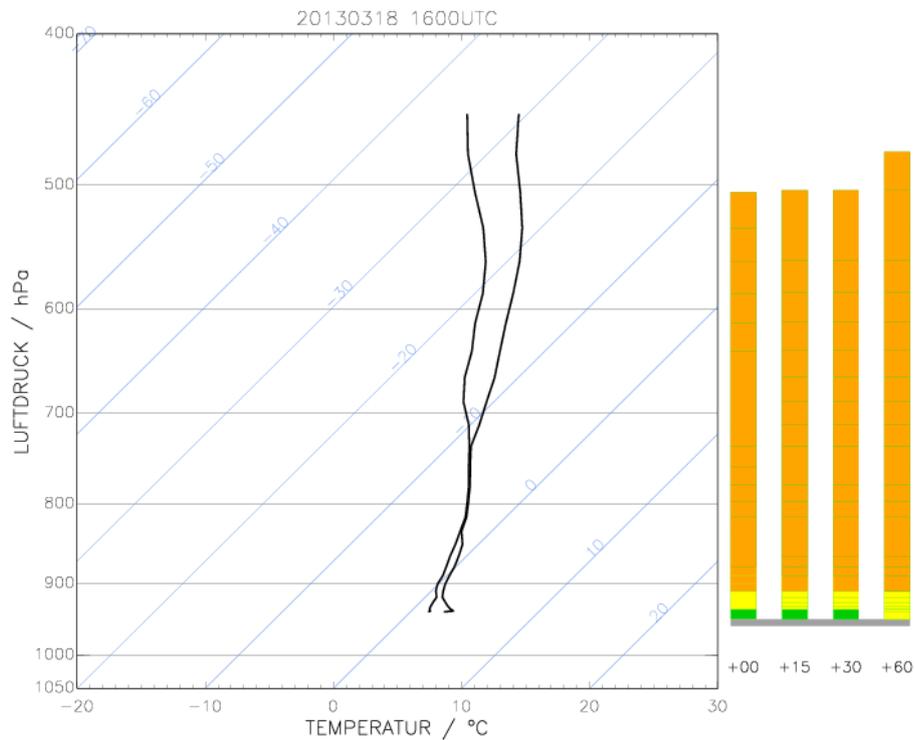


Abbildung IV.46.: Temperatur und Feuchteprofil des 18.03.2013 16:00 UTC für den Flughafen München dargestellt in einem vereinfachten Skew-T-Diagramm. Die farbigen Balken symbolisieren die WHITE-Objekte in der vertikalen Luftsäule über dem Flughafen zum angegebenen Zeitpunkt.

obachtet, während man in Regensburg und am Großen Arber Schnee registriert hatte. Aus Straubing und Fürstenzell wurde zur gleichen Zeit Regen gemeldet. Um 17:00 UTC war die Situation wie folgt: Schneefall in Nürnberg, Regensburg und am Großen Arber; Regen in Straubing, Fürstenzell und Augsburg. Auch um 18:00 UTC und 19:00 UTC stimmen die WHITE-Objekte gut mit den Beobachtungen im Untersuchungsgebiet überein. Aus Nürnberg und Regensburg wurde jeweils Schnee gemeldet, aus Fürstenzell und Augsburg jeweils Regen. Um 18:00 UTC wurde zusätzlich auch in Straubing Regen beobachtet, der in der folgenden Stunde in Schnee überging.

V. Fazit und Ausblick

Mit WHITE wurde ein integriertes System entwickelt, das mehrere Datenquellen berücksichtigt, um problematische Winterszenarien zu identifizieren und zwei Stunden vorherzusagen. WHITE bezieht die Winterwettersituationen gefrierender Niederschlag, Schnee, Mischniederschlag, Eisregen und Vereisung in Wolken durch SLD in die Untersuchung ein. Für diese flugverkehrsproblematischen Situationen werden Einflussgrößen als entscheidende Parameter aus den vertikalen Temperatur- und Feuchteverteilungen abgeleitet und anhand individuell definierter Szenarien untersucht. Ein innovativer Fuzzy-Logik-Ansatz und eine darauf basierende Kombination der entscheidenden Parameter berechnet an jedem Gitterpunkt in einem Untersuchungsgebiet um den Flughafen München Indikatoren für jedes einzelne Szenario. Eine anschließende Klassifikation auf Grundlage dieser Indikatoren ermöglicht die Formulierung vertikaler Winterwetterobjekte an jeder Gitterpunktsäule. Morphologische bildverarbeitende Prozeduren erlauben die Ableitung horizontaler Winterwetterobjekte in jeder Modellschicht. Beide Objekttypen können im abschließenden Arbeitsschritt anhand aktueller Wetterbeobachtungen korrigiert werden. WHITE berechnet mit einer temporalen Auflösung von 15 Minuten Analysen der Winterwettersituation im Untersuchungsgebiet. Zusätzlich werden jeweils für die folgenden 15 Minuten, 30 Minuten, 60 Minuten und 120 Minuten Prognosen berechnet. Neben der Analyse und Prognose der Niederschlagsituation, werden in WHITE auch die Auswirkungen des winterlichen Niederschlags auf die Bodenoberfläche bewertet.

Abgesehen von der Entwicklung des Nowcasting-Systems wurde ein Participatory-Sensing-Ansatz verwirklicht, der die Fähigkeiten der Positionsbestimmung internetfähiger Mobilgeräte nutzt, um die Evaluierung und die Leistungsfähigkeit des Systems zu optimieren und den Nutzern den Umgang mit den Ergebnissen des Systems zu erleichtern. Beide Elemente von WHITE wurden anhand zweier Kampagnen in den Wintermonaten 2012/2013 und 2013/2014 im quasi-operationellen Modus getestet. An den Kampagnen beteiligt waren unter anderem die Verkehrsleitung des Flughafens Münchens und die Deutsche Flugsicherung der Niederlassung München.

Trotz teilweise ungünstiger Wetterbedingungen im Hinblick auf Winterwetterforschung waren die Reaktionen auf WHITE und auf die im Zuge des Participatory-Sensing-Konzepts entwickelte Web-Applikation WRAP durchweg positiv. Die wesentlichen wissenschaftlichen Ziele der vorliegenden Arbeit, die Kombination meh-

erer Datenquellen anhand Fuzzy-Logik und das erfolgreiche Nowcasting von Winterwettersituationen für den Flughafen München, konnte durch die Entwicklung des WHITE-Systems erreicht werden. Die Ergebnisse werden in den Kapiteln IV.5.2.2 und IV.5.2.3 ausführlich demonstriert und im folgenden Kapitel V.1 diskutiert. Grundsätzlich konnte gezeigt werden, dass der Ansatz in Einzelfällen bereits bestens funktioniert und auch unter statistischen Aspekten großes Potential beinhaltet. Es zeigen sich aber auch noch Schwachstellen im System, zu deren Beseitigung bereits diverse Ideen und Möglichkeiten vorhanden sind. In den vorangegangenen Kapiteln wurden die meteorologischen Grundlagen (Kapitel II), der Einfluss von Winterwetter auf den Flughafen München (Kapitel III) und die Entwicklung und Evaluierung des WHITE-Systems und seinem quasi-operationellem Testbetrieb (Kapitel IV) erläutert. Neben einer übersichtlichen Verifikation wurden dort auch Fallbeispiele gezeigt, die die Leistungsfähigkeit des Systems illustrieren. Die folgenden Kapitel soll dazu dienen, die Ergebnisse und die Methodik der Evaluierung zu diskutieren sowie mögliche Erweiterungen und Verbesserungen des Systems aufzuzeigen und sich mit zusätzlichen Datenquellen auseinanderzusetzen.

V.1. Diskussion der Ergebnisse

Wie bereits angedeutet, leidet die statistische Evaluierung der WHITE-Ergebnisse unter den ungünstigen Witterungsbedingungen des vergangenen Winters. Die ursprüngliche Idee der Testkampagnen war, im Winter 2012/2013 die Implementierung und die Systematik der Algorithmen zu testen und zu optimieren und im Folgewinter anhand eines aktualisierten Systems die Qualität der Ergebnisse sowie die Klassifikation an reale Wettersituationen anzupassen. Aufgrund der ungenügenden Quantität an verwertbaren Daten aus dem für Winterwetterforschung ungeeigneten Winter 2013/2014 mussten Ergebnisse aus dem Winter 2012/2013 eines noch nicht ausgereiften Systems in die Verifikation integriert werden. Eine ausführliche Nachprozessierung aller Daten konnte im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der großen zu berücksichtigenden Datenmenge und der damit verbundenen langen Rechenzeit (das Postprocessing eines Tages nimmt etwa 7 Stunden Rechenzeit in Anspruch) nur für den Zeitraum ab dem 21.02.2013 sowie für einzelne Fallbeispiele realisiert werden. Aufgrund kontinuierlicher Anpassung der Algorithmen kann die Version von WHITE, die während der Kampagne 2012/2013 lief, nicht als einheitliches System angesehen werden. Am 21.02.2013 wurde eine Version implementiert, die die Datenkombination und Objektberechnung stabil und zuverlässig ausführte und die als Grundlage für die im Winter 2013/2014 verwendete Version angesehen werden kann. Die Ergebnisse zeigen, dass für die Verifikationsversion A ein generelles Underforecasting beobachtet werden kann, während für die Verifikationsversion B ein generelles Overforecasting registriert werden muss. In den

Daten des Winters 2012/2013 ist dieses Underforecasting für Version A noch deutlicher ausgeprägt. Um die Klassifikation zu optimieren könnten zukünftige Kampagnen in den folgenden Wintern eine Anpassung der Algorithmen in Echtzeit ermöglichen, zum Beispiel durch individuelles BIAS-Tuning der einzelnen Indikatorgrenzwerte für jedes Szenario in Abhängigkeit von der jeweiligen Wetterlage oder der spezifischen Situation und Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sein.

Da flugmeteorologisches interessantes Winterwetter selbst in „normalen“ Wintern statistisch gesehen ein seltenes Ereignis ist, ist die Anzahl der korrekt erkannten Nicht-Ereignisse generell sehr hoch. Allerdings werden in WHITE diese Nicht-Ereignisse nicht speziell berechnet und sind nur das Resultat, wenn alle Winterweterszenarien abgelehnt werden. Dennoch ist das korrekte Erkennen unproblematischer Wetterbedingungen für Flughafenbetreiber ähnlich wichtig wie die korrekte Warnung vor prekären Situationen und sollte deshalb auch bei der Evaluierung nicht unberücksichtigt bleiben. Generell ist es ein Problem, dass nur die Punktbeobachtungen an festen Wetterstationen und zu festen Uhrzeiten als Referenz zur Verfügung stehen. Es kann nicht mit Sicherheit abgeleitet werden, für welche Zeitspanne und für welche Umgebungsregion das jeweilig gemeldete Wetterphänomen gültig ist. Die Größe und Form der von WHITE berechneten Wetterobjekte können weder anhand von Radardaten noch anhand von Satellitendaten verifiziert werden. Das sich momentan im Aufbau befindende operationelle polarimetrische Radarnetzwerk des DWD könnte in absehbarer Zukunft eine flächendeckende Niederschlagsklassifikation und damit eine Verifikation der WHITE-Vorhersagen ermöglichen. Um die starren Beobachtungspunkte um zeitlich und räumlich flexible Messungen zu erweitern, wurden das Participatory-Sensing-Konzept und WRAP entwickelt. Obwohl bislang alle Nutzer gewisse Kenntnisse oder Erfahrungen in der Beurteilung von Winterwetter besitzen, muss bei der Evaluierung anhand der WRAP-Meldungen eine gewisse Subjektivität immer berücksichtigt werden. Mit Sicherheit sind nicht alle Meldungen korrekt und vorbehaltlos als Referenz zu verwenden. Dasselbe gilt in eingeschränktem Maße auch für die Beobachtungen der Wetterstationen. Vor allem automatische Stationen können zwar zwischen festem und flüssigem Niederschlag unterscheiden, die Identifizierung von gefrierendem Niederschlag oder von Mischniederschlag ist aber oft nicht möglich. Dazu kommt, dass die Wetterbeobachtungen nicht immer eindeutig mit einer WHITE-Wetterklasse in Verbindung gebracht werden können. Gut zu sehen ist das bei der Betrachtung der Klasse *Eiskörner*. Graupel, gebildet durch konvektive Prozesse, werden in WHITE als *Mischniederschlag* klassifiziert. In der Realität lassen sich die porösen Kugeln jedoch sehr oft nicht von den Eiskörnern unterscheiden, die aufgrund einer eingelagerten Warmluftschicht und einer darunterliegenden Kaltluftschicht entstehen. Auch die Vereisung in Wolken durch SLD ist nicht nur mit einem Wetterphänomen verbunden. Bei der Evaluierung von WHITE wird diese Klasse nur mit der Meldung Nebel mit Reifansatz verglichen. Dies kann nur unbefriedigende Ergebnisse liefern, da gefrierender Nebel selbstverständlich auch ohne

SLD und seines typischen Formationsprozesses entstehen kann. Ob in einer Wolke große unterkühlte Tropfen vorhanden sind, kann durch die Wetterbeobachtungen letztendlich nicht vollständig nachvollzogen werden. Wenn flüssiger Niederschlag bei negativen Untergrundtemperaturen innerhalb kurzer Zeit nach dem Auftreffen zu Eis gefriert, wird dies an den Wetterstationen oft als gefrierender Niederschlag interpretiert. Der Niederschlag an sich muss in einem solchen Fall aber nicht unterkühlt sein. Derartige Situationen sind in der WHITE-Wetterklasse *gefrierender Niederschlag* nicht beinhaltet. Man müsste an dieser Stelle die WHITE-Bodenobjekte in die Verifikation integrieren. Diese kurze Auflistung zeigt bereits, dass sowohl die Kontingenztafeln als auch die berechneten Verifikations-Attribute einen interessanten Überblick über den Vergleich der WHITE-Objekte mit Wetterbeobachtungen darstellen und gut die Probleme illustrieren, die im Zusammenhang mit der Bestimmung des Niederschlagstyps in Winterwettersituationen auftreten können. Wirklich aussagekräftige Anhaltspunkte über die Qualität von WHITE liefern sie allerdings nicht.

Punkt- oder pixelbezogene Verifikationsmethoden sind oft sehr rigoros und erfordern eine exakte Übereinstimmung von Beobachtung und Vorhersage am jeweiligen Gitterpunkt. Leichte räumliche oder zeitliche Verschiebungen werden kategorisch als fehlerhafte Vorhersage eingestuft. Im Winter können zum Beispiel durch kräftige bodennahe Winde die langsam fallenden Schneeflocken in Regionen den Boden erreichen, an denen keinerlei Radarreflektivität gemessen wird. Da in WHITE die Radarreflektivität ein wichtiger Baustein ist, kann dort logischerweise kein Wetterobjekt berechnet werden. Deswegen wäre es eventuell sinnvoll, auch im Zuge der Evaluierung Fuzzy-Logik zu verwenden und die Entfernung vom Beobachtungspunkt und die Form der Wetterobjekte zu berücksichtigen. Entsprechende Ansätze können zum Beispiel in Atger (2001), Damrath (2004) oder Ebert (2008) gefunden werden.

Aus den Tabellen ist zu erkennen, dass die Vorhersagen der Nowcasting-Schritte nicht signifikant schlechter sind als die Ergebnisse zum Analysezeitpunkt. Dies wird als Indiz gewertet, dass die generelle Struktur des Systems mit der Korrektur von First-Guess Feldern und der Ableitung von Vorhersagefeldern erfolgreich funktioniert. Eine Optimierung des Klassifikationsalgorithmus durch individuell angepasste Indikatorgrenzwerte könnte nicht nur für den Analysezeitpunkt, sondern im gleichen Maße auch für die Nowcasting-Zeitschritte verbesserte Verifikationsergebnisse liefern.

Das Modul 5 Szenario-Korrektur wurde erst für die Kampagne 2013/2014 in das System integriert. Während dieser Zeit wurden im kompletten Untersuchungsgebiet insgesamt 22205 Korrekturen anhand von Beobachtungen der bemannten und automatischen Wetterstationen vorgenommen. 2874 mal wurden Objekte (berechnet mit Klassifikationsversion A) vergrößert, 19331 mal verkleinert. Man erkennt also allein an diesen Zahlen, dass das vollständige aktualisierte WHITE-System, inklusive Modul 5 Szenario-Korrektur, in der Realität bereits deutlich

bessere Verifikationsresultate liefert, als die unkorrigierten Ergebnisse, die im Kapitel IV.5.2.2 beschrieben sind. So kann beispielsweise die Anzahl an nicht erkannten Beobachtungen zum Analysezeitpunkt um ca. 19% gesenkt werden. Vor allem auch der hohe Anteil an Fehlalarmen kann durch die Szenario-Korrektur minimiert werden. In Zahlen ausgedrückt, lässt sich die Anzahl an Fehlmeldungen zum Analysezeitpunkt um etwa 54% senken. Auf der WHITE-Internetseite (vgl. Kapitel IV.5.1) und in den von der Web-Applikation WRAP konsultierten XML-Dateien (vgl. Kapitel IV.3.6) wurden bereits die korrigierten Wetterobjekte veröffentlicht.

Auch auf die mithilfe von WRAP gesammelten Beobachtungen wurde testweise das Modul 5 Szenario-Korrektur angewendet, ohne die so korrigierten Objekte für die Nutzer zu veröffentlichen. Es wurden dabei insgesamt 27 Korrekturen vorgenommen. Davon waren 21 Objektvergrößerungen, während in 6 Fällen Objekte verkleinert werden konnten. Zukünftige Studien sollten sich unbedingt mit dieser Thematik beschäftigen und die korrigierten Objekte im Vergleich zu den unkorrigierten Objekten in der Verifikation berücksichtigen.

V.2. Ausblick

In WHITE werden die Datenquellen numerisches Wettervorhersagemodell (COSMO-DE), regelmäßige Beobachtungen und Messungen von Wetterstationen sowie Daten des deutschlandweiten Radar-Komposit verwendet. Zusätzlich werden Wetterbeobachtungen, die in Zuge des eigens entwickelten Participatory-Sensing-Ansatzes gesammelt werden, ausgewertet. Obwohl in WHITE keine reinen Modellvorhersagen benutzt werden und Ausgabefelder des COSMO-DE Modells anhand aktueller Messungen korrigiert bzw. für das Nowcasting mit Beobachtungstrends kombiniert werden, ist das System zum Teil dennoch von der Qualität des Modells abhängig. Vor allem in höheren Modellschichten macht eine Korrektur anhand von bodengebundenen Messdaten wenig Sinn. Dort ist WHITE stark von Modellvorhersagen bestimmt. Um diese Abhängigkeit zu schwächen, wurde im Verlauf der Entwicklung von WHITE mit Flugzeug getragenen Messungen und Daten von regelmäßigen Radiosondenaufstiegen an aerologischen Wetterstationen experimentiert. Linienflugzeuge ermitteln während des Flugs mit dem Messsystem AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) diverse Parameter wie Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung und übermitteln die Daten in Echtzeit über den ACARS (Aircraft Addressing and Reporting System)-Daten-Link an die beteiligten Wetterdienste. In wenigen Fällen wird auch die Feuchte in Form des Mischungsverhältnisses ermittelt (Helms u. a., 2009). Zusammen mit der geografischen Position und der Flughöhe (bestimmt über den Luftdruck) werden diese Daten in wachsendem Umfang als Eingangsinformation für numerische Wettervorhersagemodelle benutzt (Drüe u. a., 2008). In Flughafennähe können zudem aus

den Daten der sich im Steig- bzw. Sinkflug befindenden Maschinen Vertikalprofile abgeleitet werden (Drüe u. a., 2010), wobei aber beachtet werden muss, dass das vom Flugzeug ermittelte Profil kein echtes Vertikalprofil über dem Flughafen darstellt. Dasselbe Prinzip gilt für die Radiosondenaufstiege. Zweimal täglich werden um 00 UTC und 12 UTC teilweise automatisch Radiosonden gestartet, um aus den Messdaten Vertikalprofile unterschiedlicher meteorologischer Parameter abzuleiten. Im Untersuchungsgebiet von WHITE befinden sich mit München-Oberschleißheim, Kümmersbruck, Stuttgart-Schnarrenberg, Altstadt und dem Hohenpeißenberg fünf aerologische Wetterstationen. In WHITE könnten diese Daten dazu beitragen falsche Modellgitterwerte anhand der Messungen zu korrigieren. Zu Forschungszwecken könnten dafür Daten einiger historischer Fallbeispiele verwendet werden. In den meisten der Fallbeispiele konnte durch die Berücksichtigung der AMDAR-Daten oder der Radiosondendaten die Qualität der Ergebnisse gesteigert werden. Da die Daten aber nicht in Echtzeit und in vollem Umfang zur Verfügung standen, konnten sie in der aktuellen Version des WHITE-Systems nicht berücksichtigt werden.

Ein alternativer Ansatzpunkt zur Verbesserung der Vorhersage in höheren Luftschichten und des Systems im Allgemeinen könnte die Verwendung von Ensemble-Vorhersagen aus COSMO-DE, die Anwendung einer Best-Member-Selection oder die Verwendung des am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre aufgesetzten COSMO-MUC Modells sein. Das COSMO-MUC Modell ist eine spezielle Version von COSMO-DE, das ein Gebiet von $300\text{ km} * 300\text{ km}$ rund um den Flughafen München erfasst und zukünftig mit einer höheren horizontalen Auflösung als das COSMO-DE betrieben wird. Außerdem soll COSMO-MUC stündlich gestartet werden und die Output-Frequenz an individuelle Fragestellungen angepasst werden können. Für WHITE wäre eine „Time-lagged“-Ensemble-Vorhersage im viertelstündigen Rhythmus denkbar. Ein weiterer Vorteil ist, dass bereits das Vorhersagemodell aktuelle AMDAR Daten assimilieren kann. Vor allem in höhergelegenen Luftschichten ist daher mit verbesserten Modellvorhersagen zu rechnen (Gerz u. a., 2012a).

Bereits getestet wurde im Verlauf der Entwicklung von WHITE die Verwendung von MSG (Meteosat Second Generation) Satellitendaten. Der MSG ist ein geostationärer Wettersatellit, der in einer Höhe von 36000 km auf dem Nullmeridian positioniert ist. Sein Radiometer SEVIRI (Spinning enhanced visible and infrared imager) misst mit einer temporalen Auflösung von 15 Minuten in 12 spektralen Kanälen. Seine horizontale Auflösung beträgt im Nadir 3 km in allen Kanälen, außer im sogenannten HRV (High Resolution Visible) Kanal, in dem die Auflösung 1 km beträgt (Schmetz u. a., 2002). Am DLR-Institut für Physik der Atmosphäre wird vor allem an der Erkennung von Eiswolken gearbeitet (z.B. Ewald u. a., 2013; Krebs u. a., 2007; Mannstein u. a., 2010). Allerdings werden aktuell auch Forschungen mit dem Ziel durchgeführt, sowohl am Tag als auch in der Nacht zwischen Wasser- und Eiswolken unterscheiden zu können und Wolkenschichten in

unterschiedlichen Höhen zu detektieren (z.B. Bugliaro, 2012; Bugliaro u. a., 2011; Meerkötter & Bugliaro, 2009). Für einige historische Fälle wurde im Zuge der WHITE-Entwicklung der Einsatz einer Wolkenmaske getestet, um von vornherein wolkenfreie Gebiete zu detektieren und von der Objektberechnung auszuschließen. Die Fehlalarmrate kann dadurch bereits verringert werden. Durch die Erkennung unterschiedlicher Wolkenhöhen ließen sich beispielsweise Temperaturen an den jeweiligen Wolkenobergrenzen ableiten. Eine Herausforderung dabei bleibt es, die trockeneren Zwischenwolkenschichten zu berücksichtigen. Am Flughafen München ist Nebel einer der wichtigsten Wetterfaktoren sowohl im Winter als auch im Sommer. Neben Strahlungsnebel wird häufig auch Advektionsnebel in Verbindung mit leichtem Ostwind beobachtet (Mohr u. a., 2009). Der in den östlichen und südlichen Moosgebieten gebildete Nebel wird durch advektive Prozesse über den Flughafen geführt und sorgt dort für Behinderungen. Eine Detektion dieses Nebels durch Satellitendaten und eine Berechnung der Verschiebungsvektoren durch den Pyramidal-Image-Matcher könnte ein Nowcasting dieses Wetterphänomens am Flughafen München ermöglichen.

Eine der elementaren Informationen für die Betreiber des Flughafens sind die Bedingungen am Boden, insbesondere der Zustand der Bewegungsflächen. In WHITE wurde deshalb das Szenario „Boden“ integriert, um anhand von Bodenobjekten eine Beurteilung der Bedingungen zu ermöglichen. Da im Allgemeinen von den Wetterstationen keine regelmäßige Beobachtung des Bodenzustands gemeldet wird und der Zustand des Bodens stark von der Beschaffenheit des Untergrunds abhängig ist, wurde keine Evaluation der WHITE-Bodenobjekte durchgeführt. Es macht einen großen Unterschied, ob der Untergrund asphaltiert oder begrünt ist. Am Flughafen München sind in die asphaltierten Bewegungsflächen 46 Sensoren integriert, die den Oberflächenzustand, die Bodentemperatur und weitere Parameter messen und an die Verkehrsleitung übermitteln (GFS: Glatteisfrühwarnsystem). Diese GFS-Daten wurden im Zuge der Forschungen an WHITE zu Testzwecken zur Verfügung gestellt. Eine Evaluierung anhand dieser Daten wäre allerdings nur auf den Gitterpunkt Flughafen München beschränkt und wäre unter statistischen Gesichtspunkten nicht aussagekräftig. Um die Qualität der WHITE-Bodenobjekte zu verbessern, könnte ein Ansatz erfolgreich sein, der die Daten der Sensoren in Echtzeit in das System integriert. Falsche Bodentemperaturen aus dem Modell und fehlerhafte Bodenobjekte könnten so zumindest direkt am Modellgitterpunkt Flughafen München korrigiert werden. Auch von den automatischen SWIS-Stationen werden Bodenbedingungen gemeldet. Allerdings wird nur an wenigen Standorten zwischen dem Kontaminationstyp unterschieden, so dass auch hier von einer Evaluation abgesehen wurde. Die Ergebnisse wären ebenfalls nicht aussagekräftig.

Neben dem Nowcasting-Systems von WHITE ließe sich auch der Participatory-Sensing-Ansatz erweitern und optimieren. Bereits angesprochen wurde die Implementierung von Methoden, die in der Lage sind Falschmeldungen zu identifizieren

(vgl. Kapitel IV.3.5). Der Nachteil dieser Methoden wäre, dass die Anonymität der Nutzer aufgegeben werden müsste. Es ist fraglich, ob durch diese Einschränkung der Privatsphäre tatsächlich ein Vorteil entstehen würde. Vermutlich würde die Motivation zur Teilnahme am Participatory-Sensing-Ansatz nachlassen, was sich im Endeffekt kontraproduktiv auf die Akzeptanz und die Weiterentwicklung des Systems auswirken könnte. Ein anderer Ansatz verspricht dagegen erfolgreicher zu sein. Mobilgeräte der neuesten Generation besitzen integrierte Thermometer, Barometer und Hygrometer (Misra, 2014). Der Zweck der Messgeräte ist es, die Umgebungsbedingungen zu erfassen und die topographische Höhe anhand des Luftdrucks zu bestimmen. Sollten sich diese Daten als zuverlässig erweisen, könnten sie in Echtzeit dazu beitragen die Modellprognosen zu korrigieren.

Zusammenfassend lässt sich bemerken, dass WHITE im Untersuchungsgebiet um den Flughafen München einen innovativen Ansatz darstellt, um Winterwittersituationen zu analysieren und vorherzusagen. Zukünftige Kampagnen und weitere operationelle Testbetriebe bieten die Möglichkeit, die in diesem Kapitel vorgeschlagenen Neuerungen und das im vorangegangenen Abschnitt angesprochene BIAS-Tuning zu realisieren und in das System zu integrieren. Die Qualität der Ergebnisse ließe sich dadurch zweifellos optimieren. Da WHITE nicht nur für ein Gebiet um den Flughafen München implementierbar ist, sondern prinzipiell für jedes beliebige Gebiet innerhalb des gemeinsamen Gebiets des COSMO-DE Modells und des deutschlandweiten Radar-Komposit anwendbar ist, könnten zukünftige Kampagnen beispielsweise auch auf andere Flughäfen ausgedehnt werden. Konkret angedacht ist eine Implementierung für den Flughafen Frankfurt bzw. den Flughafen Hamburg. So könnte eine von regionalen Besonderheiten unabhängige Evaluierung durchgeführt werden und die Leistungsfähigkeit des Systems unter allgemeineren Gesichtspunkten getestet und verifiziert werden.

A. Anhang

Alle Regionen 2013/2014 WRAPA		Beobachtung						
		FZ	SN	MIX	IP	SLD	Kein WW	
		0	69	46	1	0	256	372
Vorhersage +00	FZ	0	0	0	0	0	0	0
	SN	0	35	4	0	0	1	40
	MIX	0	16	25	0	0	7	48
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	0	0	0	0	0	0	0
	Kein WW	0	18	17	1	0	248	284

Alle Regionen 2013/2014 WRAPB		Beobachtung						
		FZ	SN	MIX	IP	SLD	Kein WW	
		0	69	46	1	0	256	372
Vorhersage +00	FZ	0	0	0	0	0	0	0
	SN	0	52	15	0	0	11	78
	MIX	0	15	28	1	0	34	78
	IP	0	1	1	0	0	0	2
	SLD	0	0	0	0	0	4	4
	Kein WW	0	1	2	0	0	207	210

Tabelle A.1.: Multi-Kategorie Kontingenztabelle der Winterkampagne 2013/2014 für das gesamte Untersuchungsgebiet. Vorhersagen verifiziert anhand WRAP-Meldungen. Klassifikationsgrenzwerte oben 50 (GW_{mix}) bzw. 66.66 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{sld}) und unten 33.33 (GW_{mix}) bzw. 50 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{sld}). Die Abkürzungen stehen für die Beobachtungen von gefrierender Niederschlag (FZ), Schnee (SN), Schneeregen (MIX), Eiskörner (IP), Nebel mit Reifansatz (SLD), Regen bzw. Beobachtung ohne Niederschlag (kein WW) und für die WHITE-Objekte gefrierender Niederschlag (FZ), Schnee (SN), Mischniederschlag (MIX), Eisregen/Eiskörner (IP), Wolkenvereisung (SLD), Regen bzw. kein WHITE-Objekt (kein WW).

A. Anhang

Region I: Alpen 2013/2014 SYNOP A		Beobachtung						
		FZ	SN	MIX	IP	SLD	Kein WW	
		19	2298	206	48	919	66128	69618
Vorhersage +00	FZ	6	0	0	0	0	14	20
	SN	3	1089	104	24	0	1108	2328
	MIX	7	74	37	2	2	543	665
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	3	361	9	5	59	1406	1843
	Kein WW	0	774	56	17	858	63057	64762
		19	2252	205	48	903	64100	67527
Vorhersage +15	FZ	5	0	0	0	0	17	22
	SN	4	1103	103	25	5	2202	3442
	MIX	7	71	34	2	0	887	1001
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	1	403	13	6	54	874	1351
	Kein WW	2	675	55	15	844	60120	61711
		19	2171	201	47	887	62957	66282
Vorhersage +30	FZ	5	0	0	0	0	12	17
	SN	4	1079	95	19	4	1782	2983
	MIX	8	84	36	0	2	684	814
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	1	369	11	7	58	1071	1517
	Kein WW	1	639	59	21	823	59408	60951
		19	2044	191	45	826	61143	64268
Vorhersage +60	FZ	2	0	3	0	0	3	8
	SN	3	1024	80	19	3	1839	2968
	MIX	0	78	35	2	0	742	857
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	5	317	10	4	60	1059	1455
	Kein WW	9	625	63	20	763	57500	58980
		18	1979	182	38	791	59782	62790
Vorhersage +120	FZ	0	0	0	0	0	0	0
	SN	1	943	89	14	5	2034	3086
	MIX	0	68	35	4	2	985	1094
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	1	312	14	5	40	942	1314
	Kein WW	16	656	44	15	744	55821	57296

Tabelle A.2.: Multi-Kategorie Kontingenztafel der Winterkampagne 2013/2014 für die Region Alpen (I). Vorhersagen verifiziert anhand SYNOP-Meldungen. Klassifikationsgrenzwerte 50 (GW_{mix}) bzw. 66.66 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{slid}). Abkürzungen wie in Tabelle A.1

Region II: Bayern 2013/2014 SYNO P A		Beobachtung						
		FZ	SN	MIX	IP	SLD	Kein WW	
		188	10352	2236	457	4258	969059	986550
Vorhersage +00	FZ	8	8	0	0	2	228	246
	SN	4	4084	297	80	0	4751	9216
	MIX	4	2159	729	65	0	5641	8598
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	0	117	1	8	72	6465	6663
	Kein WW	172	3984	1209	304	4184	951974	961827
		185	10077	2210	453	4202	936913	954040
Vorhersage +15	FZ	8	5	0	0	2	280	295
	SN	3	3521	276	75	9	9239	13123
	MIX	8	1945	609	50	4	9295	11911
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	0	142	5	10	35	2870	3062
	Kein WW	166	4464	1320	318	4152	915229	925649
		184	9972	2177	441	4076	924676	941526
Vorhersage +30	FZ	5	7	2	2	0	310	326
	SN	4	3768	374	69	2	7545	11762
	MIX	3	2144	679	48	4	8238	11116
	IP	0	0	0	0	0	6	6
	SLD	0	133	2	2	40	3553	3730
	Kein WW	172	3920	1120	320	4030	905024	914586
		165	9200	2035	423	3902	898014	913739
Vorhersage +60	FZ	6	9	0	0	0	285	300
	SN	7	3394	272	69	2	7240	10984
	MIX	2	1717	516	50	4	7903	10192
	IP	1	0	0	0	0	2	3
	SLD	0	127	1	5	49	3665	3847
	Kein WW	149	3953	1246	299	3847	878919	888413
		159	8609	1923	411	3673	877258	892033
Vorhersage +120	FZ	2	3	0	0	0	20	25
	SN	5	2961	234	47	9	7222	10478
	MIX	6	1853	541	51	24	9702	12177
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	2	103	5	5	43	3207	3365
	Kein WW	144	3689	1143	308	3597	857107	865988

Tabelle A.3.: Multi-Kategorie Kontingenztafel der Winterkampagne 2013/2014 für die Region Bayern (II). Vorhersagen verifiziert anhand SYNOP-Meldungen. Klassifikationsgrenzwerte 50 (GW_{mix}) bzw. 66.66 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{slid}). Abkürzungen wie in Tabelle A.1

A. Anhang

Region III: MUC 2013/2014 SYNO P A		Beobachtung							
		FZ	SN	MIX	IP	SLD	Kein WW		
		6	127	42	2	258	16546	16981	
Vorhersage +00	FZ	0	0	0	0	0	0	0	
	SN	0	48	3	0	0	64	115	
	MIX	2	39	23	0	0	120	184	
	IP	0	0	0	0	0	0	0	
	SLD	0	0	0	0	10	33	43	
	Kein WW	4	40	16	2	248	16329	16639	
		6	121	42	2	254	15980	16385	
Vorhersage +15	FZ	0	0	0	0	0	1	1	
	SN	0	38	3	0	0	110	151	
	MIX	0	26	19	0	0	215	280	
	IP	0	0	0	0	0	0	0	
	SLD	0	0	0	0	5	36	41	
	Kein WW	6	57	20	2	249	15598	15932	
		4	112	41	2	240	15672	16071	
Vorhersage +30	FZ	0	0	0	0	0	1	1	
	SN	0	42	0	0	0	111	153	
	MIX	0	16	21	0	0	174	211	
	IP	0	0	0	0	0	0	0	
	SLD	0	0	0	0	15	17	32	
	Kein WW	4	54	20	2	225	15369	15674	
		6	117	38	2	235	15338	15736	
Vorhersage +60	FZ	0	0	0	0	0	4	4	
	SN	0	46	0	0	0	98	144	
	MIX	0	10	16	0	0	182	208	
	IP	0	0	0	0	0	0	0	
	SLD	0	0	0	0	10	19	29	
	Kein WW	6	61	22	2	225	15085	15351	
		6	112	38	2	224	14978	15360	
Vorhersage +120	FZ	0	0	0	0	0	0	0	
	SN	0	34	2	0	0	110	146	
	MIX	0	32	18	0	1	175	226	
	IP	0	0	0	0	0	0	0	
	SLD	0	0	0	0	7	6	13	
	Kein WW	6	46	18	2	216	14687	14975	

Tabelle A.4.: Multi-Kategorie Kontingenztafel der Winterkampagne 2013/2014 für die Region MUC (III). Vorhersagen verifiziert anhand SYNOP-Meldungen. Klassifikationsgrenzwerte 50 (GW_{mix}) bzw. 66.66 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{sld}). Abkürzungen wie in Tabelle A.1

Region I: Alpen 2013/2014 SYNOP B		Beobachtung						
		FZ	SN	MIX	IP	SLD	Kein WW	
		19	2298	206	48	919	66128	69618
Vorhersage +00	FZ	9	0	3	0	0	17	29
	SN	3	1144	113	23	5	3285	4573
	MIX	2	98	63	3	3	3256	3425
	IP	0	6	9	0	0	58	73
	SLD	5	655	18	10	117	3025	3830
	Kein WW	0	395	0	12	794	56487	57688
		19	2252	205	48	903	64100	67527
Vorhersage +15	FZ	7	0	3	0	0	4	14
	SN	4	1158	115	24	7	3170	4478
	MIX	2	86	65	1	3	3195	3352
	IP	0	10	7	0	0	66	83
	SLD	5	652	15	12	108	2021	2813
	Kein WW	1	346	0	11	785	55644	56787
		19	2171	201	47	887	62957	66282
Vorhersage +30	FZ	11	0	3	0	0	13	27
	SN	0	1142	97	24	6	3122	4391
	MIX	2	85	63	0	2	3005	3157
	IP	3	11	11	0	0	75	100
	SLD	3	619	27	12	141	2363	3165
	Kein WW	0	314	0	11	738	54379	55442
		19	2044	191	45	826	61143	64268
Vorhersage +60	FZ	5	0	3	0	0	8	16
	SN	3	1070	92	21	5	3076	4267
	MIX	2	78	54	1	0	2765	2900
	IP	0	11	8	0	0	77	96
	SLD	5	539	32	11	132	2384	3103
	Kein WW	4	346	2	12	689	52833	53886
		18	1979	182	38	791	59782	62790
Vorhersage +120	FZ	1	2	0	0	0	9	12
	SN	1	1026	96	17	11	2868	4019
	MIX	0	64	48	0	0	2443	2555
	IP	0	9	3	0	0	91	103
	SLD	3	465	34	7	95	2185	2789
	Kein WW	13	413	1	14	685	52186	53312

Tabelle A.5.: Multi-Kategorie Kontingenztafel der Winterkampagne 2013/2014 für die Region Alpen (I). Vorhersagen verifiziert anhand SYNOP-Meldungen. Klassifikationsgrenzwerte 33.33 (GW_{mix}) bzw. 50 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{slid}). Abkürzungen wie in Tabelle A.1

A. Anhang

Region II: Bayern 2013/2014 SYNOB B		Beobachtung						
		FZ	SN	MIX	IP	SLD	Kein WW	
		188	10352	2236	457	4258	969059	986550
Vorhersage +00	FZ	21	27	1	0	1	2093	2143
	SN	4	5026	630	122	11	17326	23119
	MIX	5	1786	853	127	19	44990	47780
	IP	4	323	77	19	0	2654	3077
	SLD	2	401	9	27	276	21742	22457
	Kein WW	152	2789	666	162	3951	880254	887974
		185	10077	2210	453	4202	936913	954040
Vorhersage +15	FZ	18	22	0	0	0	1710	1750
	SN	3	4849	635	118	13	17013	22631
	MIX	6	1839	768	139	23	44772	47547
	IP	4	217	48	10	0	2136	2415
	SLD	3	399	16	29	199	11894	12540
	Kein WW	151	2751	743	157	3967	859388	867157
		184	9972	2177	441	4076	924676	941526
Vorhersage +30	FZ	15	27	6	0	0	1900	1948
	SN	4	4805	649	111	8	16645	22222
	MIX	0	1751	759	128	29	43767	46434
	IP	4	314	54	10	0	2627	3009
	SLD	6	401	15	31	206	13303	13962
	Kein WW	155	2674	694	161	3833	846434	853951
		165	9200	2035	423	3902	898014	913739
Vorhersage +60	FZ	21	17	3	0	1	1899	1941
	SN	6	4332	582	110	2	15916	20948
	MIX	4	1654	774	131	28	41427	44018
	IP	3	221	55	13	0	2348	2640
	SLD	1	404	11	18	222	12648	13304
	Kein WW	130	2572	610	151	3649	823776	830888
		159	8609	1923	411	3673	877258	892033
Vorhersage +120	FZ	13	14	3	2	0	1918	1950
	SN	7	3903	453	82	33	14304	18782
	MIX	4	1496	719	111	34	38480	40844
	IP	4	249	61	18	2	2290	2624
	SLD	9	341	19	20	146	12114	12649
	Kein WW	122	2606	668	178	3458	808152	815184

Tabelle A.6.: Multi-Kategorie Kontingenztafel der Winterkampagne 2013/2014 für die Region Bayern (II). Vorhersagen verifiziert anhand SYNOB-Meldungen. Klassifikationsgrenzwerte 33.33 (GW_{mix}) bzw. 50 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{sld}). Abkürzungen wie in Tabelle A.1

Region III: MUC 2013/2014 SYNOP B		Beobachtung							
		FZ	SN	MIX	IP	SLD	Kein WW		
		6	127	42	2	258	16546	16981	
Vorhersage +00	FZ	0	0	0	0	0	41	41	
	SN	2	69	15	2	5	301	394	
	MIX	2	14	26	0	0	842	884	
	IP	0	1	0	0	1	46	46	
	SLD	0	0	0	0	30	153	183	
	Kein WW	2	43	1	0	222	15163	15431	
		6	121	42	2	254	15960	16385	
Vorhersage +15	FZ	0	0	0	0	0	30	30	
	SN	2	60	14	0	0	279	355	
	MIX	2	13	23	1	0	808	847	
	IP	0	1	2	0	1	67	71	
	SLD	0	0	0	0	19	123	142	
	Kein WW	2	47	3	1	234	14653	14940	
		4	112	41	2	240	15672	16071	
Vorhersage +30	FZ	0	0	0	0	0	15	15	
	SN	0	59	11	0	0	275	345	
	MIX	0	17	24	1	0	746	788	
	IP	0	7	0	0	0	70	77	
	SLD	0	0	0	0	19	113	132	
	Kein WW	4	29	6	1	221	14453	14714	
		6	117	38	2	235	15338	15736	
Vorhersage +60	FZ	0	1	0	0	0	24	25	
	SN	2	65	10	0	0	250	327	
	MIX	2	13	19	1	0	734	769	
	IP	0	3	7	0	0	75	85	
	SLD	0	0	0	0	17	115	132	
	Kein WW	2	35	2	1	218	14140	14398	
		6	112	38	2	224	14978	15360	
Vorhersage +120	FZ	0	0	0	0	0	35	35	
	SN	0	58	9	0	0	233	300	
	MIX	0	10	22	1	0	711	744	
	IP	0	1	6	0	1	71	79	
	SLD	0	0	0	0	14	98	112	
	Kein WW	6	43	1	1	209	13830	14090	

Tabelle A.7.: Multi-Kategorie Kontingenztafel der Winterkampagne 2013/2014 für die Region MUC (III). Vorhersagen verifiziert anhand SYNOP-Meldungen. Klassifikationsgrenzwerte 33.33 (GW_{mix}) bzw. 50 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{slid}). Abkürzungen wie in Tabelle A.1

Region I: Alpen 2012/2013 SYNO P A		Beobachtung						
		FZ	SN	MIX	IP	SLD	Kein WW	
		5	870	49	6	31	5260	6221
Vorhersage +00	FZ	0	16	0	0	0	22	38
	SN	0	245	13	1	0	157	416
	MIX	4	14	4	0	0	32	54
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	0	100	1	0	0	228	329
	Kein WW	1	495	31	5	31	4821	5384
		5	909	51	6	33	5351	6355
Vorhersage +15	FZ	0	0	0	0	0	7	7
	SN	0	249	11	1	0	163	424
	MIX	4	14	3	0	0	31	52
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	0	116	2	0	0	245	363
	Kein WW	1	530	35	5	33	4905	5509
		5	910	51	6	33	5368	6373
Vorhersage +30	FZ	0	0	0	0	0	10	10
	SN	0	277	14	1	0	139	431
	MIX	4	10	3	0	0	27	44
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	0	116	2	0	0	243	361
	Kein WW	1	507	32	5	33	4949	5527
		5	879	49	5	33	5286	6257
Vorhersage +60	FZ	0	0	0	0	0	13	13
	SN	0	257	11	1	0	146	415
	MIX	0	8	3	0	0	28	39
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	0	123	2	0	0	225	350
	Kein WW	5	491	33	4	33	4874	5440

Tabelle A.8.: Multi-Kategorie Kontingenztabelle der Winterkampagne 2012/2013 (ab dem 21.02.2013) für die Region Alpen (I). Vorhersagen verifiziert anhand SYNO P-Meldungen. Klassifikationsgrenzwerte 50 (GW_{mix}) bzw. 66.66 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{std}). Abkürzungen wie in Tabelle A.1

Region II: Bayern 2012/2013 SYNOP A		Beobachtung						
		FZ	SN	MIX	IP	SLD	Kein WW	
		215	5174	705	29	568	28649	35340
Vorhersage +00	FZ	6	29	1	0	13	154	203
	SN	10	2371	80	10	18	521	3010
	MIX	7	263	82	4	1	289	646
	IP	0	26	0	0	0	7	33
	SLD	2	616	35	0	100	1363	2116
	Kein WW	190	1869	507	15	436	26315	29332
		215	5376	730	29	577	29068	35995
Vorhersage +15	FZ	5	20	2	0	6	148	181
	SN	15	2514	83	9	14	490	3125
	MIX	1	289	93	4	6	270	663
	IP	0	13	0	0	0	7	20
	SLD	2	612	37	0	100	1380	2131
	Kein WW	192	1928	515	16	451	26773	29875
		216	5349	729	29	578	29168	36069
Vorhersage +30	FZ	6	24	1	0	6	135	172
	SN	10	2555	79	4	12	501	3161
	MIX	5	315	92	4	6	269	691
	IP	0	13	0	0	0	8	21
	SLD	1	605	37	0	95	1360	2098
	Kein WW	194	1837	520	21	459	26895	29926
		214	5207	709	29	570	28671	35400
Vorhersage +60	FZ	4	23	1	0	12	134	174
	SN	12	2439	95	6	10	505	3067
	MIX	6	288	90	3	7	282	676
	IP	0	21	0	0	0	7	28
	SLD	2	595	33	0	97	1317	2044
	Kein WW	190	1841	490	20	444	26426	29411

Tabelle A.9.: Multi-Kategorie Kontingenztabelle der Winterkampagne 2012/2013 (ab dem 21.02.2013) für die Region Bayern (II). Vorhersagen verifiziert anhand SYNOP-Meldungen. Klassifikationsgrenzwerte 50 (GW_{mix}) bzw. 66.66 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{std}). Abkürzungen wie in Tabelle A.1

Region III: MUC 2012/2013 SYNO P A		Beobachtung						
		FZ	SN	MIX	IP	SLD	Kein WW	
		0	204	21	0	10	927	1162
Vorhersage +00	FZ	0	0	0	0	0	14	14
	SN	0	140	6	0	1	21	168
	MIX	0	5	15	0	0	5	25
	IP	0	0	0	0	0	1	1
	SLD	0	8	0	0	6	25	39
	Kein WW	0	51	0	0	3	861	915
		0	210	21	0	8	935	1174
Vorhersage +15	FZ	0	0	0	0	0	6	6
	SN	0	149	6	0	1	20	176
	MIX	0	21	15	0	0	9	45
	IP	0	0	0	0	0	1	1
	SLD	0	7	0	0	2	28	37
	Kein WW	0	33	0	0	5	871	909
		0	210	21	0	10	936	1177
Vorhersage +30	FZ	0	0	0	0	0	2	2
	SN	0	148	9	0	1	17	175
	MIX	0	18	12	0	0	6	36
	IP	0	0	0	0	0	0	0
	SLD	0	7	0	0	2	25	34
	Kein WW	0	37	0	0	7	886	930
		0	204	19	0	10	923	1156
Vorhersage +60	FZ	0	0	0	0	0	5	5
	SN	0	151	4	0	1	19	175
	MIX	0	12	15	0	0	12	39
	IP	0	0	0	0	0	3	3
	SLD	0	7	0	0	2	22	31
	Kein WW	0	34	0	0	7	862	903

Tabelle A.10.: Multi-Kategorie Kontingenztafel der Winterkampagne 2012/2013 (ab dem 21.02.2013) für die Region MUC (III). Vorhersagen verifiziert anhand SYNO-P-Meldungen. Klassifikationsgrenzwerte 50 (GW_{mix}) bzw. 66.66 (GW_{sn} , GW_{fz} , GW_{ip} , GW_{mp} , GW_{verd} , GW_{sld}). Abkürzungen wie in Tabelle A.1

Abbildungsverzeichnis

I.1	Schematische Darstellung des WHITE-Systems	3
II.1	Phasenübergänge von Wasser	6
II.2	Köhler-Kurve	8
II.3	Heterogene Gefriermechanismen	10
II.4	Morphologie von Eispartikel	13
II.5	Schematisierte Temperaturprofile Schnee - Mischniederschlag - Regen	17
II.6	Schematisierte Temperaturprofile Gefrierender Regen - Eisregen/ Eiskörner - Regen	19
II.7	Schematisiertes Temperaturprofil gefrierender Niesel/Vereisung in stratiformer Bewölkung mit SLD	20
III.1	Klimareihen für den Flughafen München	29
III.2	Statistik über Neuschneemengen und Sperrzeiten am Flughafen München	30
III.3	Statistik der Enteisungen und Bahnsperungen am Flughafen München in den Wintermonaten 2011/2012, 2012/2013 und 2013/2014	32
III.4	Testfahrzeug des Flughafen Münchens zur Ermittlung der Reibungskoeffizienten	33
III.5	Übersichtskarte Flughafen München	35
III.6	Flugzeugenteisung am Flughafen München	36
IV.1	Beobachtungsinstrumente MRR-2, Parsivel und POLDIRAD	38
IV.2	Schematisches Konzept des WHITE-Nowcasting-Systems	46
IV.3	Untersuchungsgebiet von WHITE mit den verfügbaren Beobachtungsstationen	48
IV.4	Abdeckungsgebiet von COSMO-DE	49
IV.5	Standorte der Messgeräte des deutschen Radarnetzwerks	51
IV.6	Schematische Darstellung der Cressman-Interpolation	53
IV.7	ABOM-Methode: Häufigkeitsverteilungen der Faktoren	57
IV.8	MAE unterschiedlicher Vorhersagemethoden	58
IV.9	Exemplarische Abbildung von Radar-Daten auf das COSMO-DE Gitter	59
IV.10	Pyramidal-Image-Matching-Verfahren mit drei Schichten	60
IV.11	Exemplarische Extrapolation einer Niederschlagszellstruktur	61

IV.12	Winterwetterszenario „Warme Nase“	64
IV.13	Winterwetterszenario „Schnee/Regen“	65
IV.14	Winterwetterszenario „Vereisung in Wolken (SLD)“	67
IV.15	Winterwetterszenario „Verdunstung“	68
IV.16	Beispiel trapezförmiger Zugehörigkeitsfunktionen	70
IV.17	Mögliche Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Logik	72
IV.18	Häufigkeitsverteilungen und Fuzzy-Set-Funktionen für Szenario „Warme Nase“	75
IV.19	Fuzzy-Set-Funktionen für die Entstehung von Eisregen im Szenario „Warme Nase“	76
IV.20	Beispiel zur Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung	79
IV.21	Häufigkeitsverteilungen und Fuzzy-Set-Funktionen für das Szenario „Schnee/Regen“	80
IV.22	Fuzzy-Set-Funktionen für das Szenario „Vereisung in Wolken (SLD)“	83
IV.23	Fuzzy-Set-Funktionen für das Szenario „Verdunstung“	85
IV.24	Fuzzy-Set-Funktionen für das Unterszenario „Neuschnee“	86
IV.25	Baumstruktur der Klassifikation in WHITE	89
IV.26	Schematische Darstellung der Szenario-Korrektur	92
IV.27	Grafische Ausgabe von WHITE	95
IV.28	XML-Ausgabe von WHITE	96
IV.29	Statistik über die Nutzung des mobilen Internets 2012 und 2013	98
IV.30	Absatz von Smartphones und Anzahl der Smartphone-Nutzer in Deutschland	99
IV.31	Statistik über die Nutzung von Smartphone-Apps nach Themen	100
IV.32	Screenshot der Standard-Web-Applikation (DPC WRAP)	103
IV.33	Screenshots der mobilen Web-Applikation WRAP	104
IV.34	Screenshot der Antwortseite der mobilen Version von WRAP	105
IV.35	Karte des Untersuchungsgebiet	107
IV.36	Operationeller Ablauf von WHITE	108
IV.37	Screenshot des WHITE-Internetauftritts	110
IV.38	Nutzung von WHITE am Flughafen München	113
IV.39	Geografische Verteilung der WRAP-Meldungen	114
IV.40	METAR Meldungen am Flughafen München vom 20.01.2013	119
IV.41	WHITE-Objekte der bodennahen Modellschicht vom 20.01.2013, 16:30 UTC	121
IV.42	WHITE-Ergebnisse und MRR-Messungen für den 20.01.2013	122
IV.43	METAR Meldungen am Flughafen München vom 18.03.2013	124
IV.44	MRR- und Parsivel-Messungen für den 18.03.2013	125
IV.45	WHITE-Objekte der bodennahen Modellschicht vom 18.03.2013, 16:00 UTC bis 19:00 UTC	126
IV.46	WHITE-Ergebnisse am Flughafen München für den 18.03.2013	128

Tabellenverzeichnis

II.1	Empirische Werte für die Sättigungsdampfdrücke über Wasser und Eis in Abhängigkeit von der Temperatur	12
II.2	Einflussfaktoren auf den Reibungskoeffizienten	22
II.3	Beurteilungskriterien für den Bericht über den Zustand der Start- und Landebahnen	23
IV.1	Linguistische Variablen im Szenario „Warme Nase“	73
IV.2	Bedingungsgleichungen für die Entstehung von gefrierendem Regen im Szenario „Warme Nase“	76
IV.3	Bedingungsgleichungen für die Entstehung von Eisregen/Eiskörner im Szenario „Warme Nase“	76
IV.4	Bedingungsgleichungen für die Entstehung von Mischniederschlag im Szenario „Warme Nase“	77
IV.5	Linguistische Variablen im Szenario „Schnee/Regen“	78
IV.6	Bedingungsgleichungen des Szenarios „Schnee/Regen“	81
IV.7	Linguistische Variablen im Szenario „Vereisung in Wolken (SLD)“	82
IV.8	Bedingungsgleichungen des Szenarios „Vereisung in Wolken (SLD)“	84
IV.9	Bedingungsgleichungen des Szenarios „Verdunstung“	84
IV.10	Linguistische Variablen im Unterszenario „Neuschnee“	85
IV.11	Bedingungsgleichungen des Unterszenarios „Neuschnee“	87
IV.12	Szenarien, Parameter und Winterwetterklassen in WHITE	91
IV.13	2x2 Kontingenztafel	111
IV.14	Multi-Kategorie Kontingenztafel	112
A.1	Kontingenztafel gesamtes Gebiet (WRAP), 2013/2014	137
A.2	Kontingenztafel Region I (SYNOP A), 2013/2014	138
A.3	Kontingenztafel Region II (SYNOP A), 2013/2014	139
A.4	Kontingenztafel Region III (SYNOP A), 2013/2014	140
A.5	Kontingenztafel Region I (SYNOP B), 2013/2014	141
A.6	Kontingenztafel Region II (SYNOP B), 2013/2014	142
A.7	Kontingenztafel Region III (SYNOP B), 2013/2014	143
A.8	Kontingenztafel Region I (SYNOP A), 2012/2013	144
A.9	Kontingenztafel Region II (SYNOP A), 2012/2013	145
A.10	Kontingenztafel Region III (SYNOP A), 2012/2013	146

Literatur

- Adams, W. M. & J. Vivekanandan (1993): „Snowfall rate and supercooled liquid water content retrieval using the dual-frequency radar technique“. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Bd. 4, S. 1922–1924.
- Alatypö, V. (2008): „Efficiency of runway de-icing chemicals in practice“. In: *International Safer Roads Conference, Cheltenham, 12.-14. Mai*.
- Alduchov, O. A. & R. E. Eskridge (1996): „Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure“. In: *Journal of Applied Meteorology - Notes and Correspondence* 35, S. 601–609.
- Atger, F. (2001): „Verification of intense precipitation forecasts from single models and ensemble prediction systems“. In: *Nonlinear Processes in Geophysics* 8, S. 401–417.
- BFU (2004): *Untersuchungsbericht 3X286-0/01*. Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung.
- BVDW (2012): *Mobile Internetnutzung steht bei den Deutschen hoch im Kurs*. Abruf am 13.01.2014. Bundesverband Digitale Wirtschaft (BVDW) e.V. URL: <http://www.bvdw.org/presse/news/article/bvdw-mobile-internetnutzung-steht-bei-den-deutschen-hoch-im-kurs.html>.
- Bailey, M. E., G. A. Isaac, I. Gultepe, I. Heckman & J. Reid (2012): „Adaptive blending of model and observations for automated short-range forecasting: Examples from the Vancouver 2010 Olympic and Paralympic Winter Games“. In: *Pure and Applied Geophysics* 171, S. 257–276.
- Baldauf, M., J. Förstner, S. Klink, T. Reinhardt, C. Schraff, A. Seifert & K. Stephan (2009): *Kurze Beschreibung des Lokal-Modells Kürzestfrist COSMO-DE (LMK) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD*. Deutscher Wetterdienst (DWD).
- Baldauf, M., A. Seifert, J. Förstner, D. Majewski, M. Raschendorfer & T. Reinhardt (2011): „Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: Description and sensitivities“. In: *Monthly Weather Review* 139, S. 3887–3905.
- Baldwin, E. B. & S. P. Contorno (1993): „Development of a weather-type prediction system for NMC’s mesoscale ETA model“. In: *13th Conference on Weather Analysis and Forecasting, Vienna, Virginia, 2.-6. August*. American Meteorological Society.

-
- Berenguer, M., D. Sempere-Torres, C. Corral & R. Sanchez-Diezma (2006): „A Fuzzy Logic technique for identifying nonprecipitating echoes in radar scans“. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 23, S. 1157–1180.
- Bernstein, B. C. (2000): „Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events“. In: *Weather and Forecasting* 15, S. 485–508.
- Bernstein, B. C., T. A. Omeron, F. McDonough & M. K. Politovich (1997): „The relationship between aircraft icing and synoptic-scale weather conditions“. In: *Weather and Forecasting* 12, S. 742–762.
- Bernstein, B. C., T. A. Omeron, M. K. Politovich & F. McDonough (1998): „Surface weather features associated with freezing precipitation and severe in-flight aircraft icing“. In: *Atmospheric Research* 46, S. 57–73.
- Bernstein, B. C., F. McDonough, M. K. Politovich, B. G. Brown, T. P. Ratvasky, D. R. Miller, C. A. Wolff & G. Cuning (2005): „Current Icing Potential: Algorithm description and comparison with aircraft observations“. In: *Journal of Applied Meteorology* 44, S. 969–986.
- Boucher, R. J. & J. G. Wiener (1985): „Radar determination of snowfall rate and accumulation“. In: *Journal of Climate and Applied Meteorology* 24, S. 68–73.
- Bourgouin, P. (2000): „A method to determine precipitation types“. In: *Weather and Forecasting* 15, S. 583–592.
- Brandes, E. A. & K. Ikeda (2004): „Freezing-level estimation with polarimetric radar“. In: *Journal of Applied Meteorology* 43, S. 1541–1553.
- Braun, S. A. & R. A. Houze (1995): „Melting and freezing in a mesoscale convective system“. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 121, 55–77.
- Bugliaro, L. (2012): *persönliche Mitteilung im Mai 2012*.
- Bugliaro, L., T. Zinner, C. Keil, B. Mayer, R. Hollmann, M. Reuter & W. Thomas (2011): „Validation of cloud property retrievals with simulated satellite radiances: A case study for SEVIRI“. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, S. 5603–5624.
- CAA (2000): *Aircraft Icing Handbook*. Civil Aviation Authority.
- Carrapetta, J., N. Youdale, A. Chow & V. Sivaraman (2010): *Haze Watch Project*. Abruf am 17.06.2013. URL: <http://www.pollution.ee.unsw.edu.au/>.
- Carriere, J.-M., S. Alquier, C. Le Bot & E. Moulin (1997): „Statistical verification of forecast icing risk indices“. In: *Meteorological Applications* 4, S. 115–130.
- Carriere, J.-M., C. Lainard, C. Le Bot & F. Robart (2000): „A climatological study of surface freezing precipitation in Europe“. In: *Meteorological Applications* 7, S. 229–238.
- Celik, F. & J. D. Marwitz (1999): „Droplet spectra broadening by ripening process. Part I: Roles of curvature and salinity of cloud“. In: *Journal of Atmospheric Science* 56, S. 3091–3105.
- Christin, D., D. Rodriguez Pons-Sorolla, M. Hollick & S. S. Kanhere (2014): „Trust-Meter: A trust assessment scheme for collaborative privacy mechanisms in participatory sensing applications“. In: *IEEE Ninth International Conference on*

- Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, Singapore, 21.-24. April.
- Cober, S. G., G. A. Isaac & J. W. Strapp (1995): „Aircraft icing measurements in East Coast winter storms“. In: *Journal of Applied Meteorology* 34, S. 88–100.
- Cober, S. G., G. A. Isaac, J. W. Strapp & D. Marcotte (1996): „Analysis of aircraft icing environments associated with supercooled drizzle“. In: *Proceedings of the FAA International Conference on Aircraft Inflight Icing, Springfield, Virginia, 6.-8. Mai*.
- Cober, S., B. Bernstein, R. Jeck, E. Hill, G. Isaac, J. Riley & A. Shah (2009): *Data and analysis for the development of an engineering standard for supercooled large drop conditions*. U.S. Department of Transportation.
- ComScore (2014): *Anzahl der Smartphone-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2013*. Zitiert nach de.statista.com; Abruf am 10.01.2014. ComScore, Inc. URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/198959/umfrage/anzahl-der-smartphonenuutzer-in-deutschland-seit-2010/>.
- Comfort, G. (2001): *Wet runway friction: Literature and information review*. BMT Fleet Technology Limited.
- Cortinas, J. V., B. C. Bernstein, C. C. Robbins & J. W. Strapp (2004): „An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada: 1976-90“. In: *Weather and Forecasting* 19, S. 377–390.
- Cox, J. & B. Plale (2011): *Improving automatic weather observations with the public Twitter stream*. School of Informatics und Computing, Indiana University.
- Cressman, G. P. (1959): „An operational objective analysis system“. In: *Monthly Weather Review* 87, S. 367–374.
- D21 (2013): *Mobile Internetnutzung - Entwicklungsschub für die digitale Gesellschaft!* Abruf am 13.01.2014. Initiative D21. URL: http://www.initiaved21.de/wp-content/uploads/2013/02/studie_mobilesinternet_d21_huawei_2013.pdf.
- DWD (2014): *Übersicht über das Mess- und Beobachtungsnetz des DWD*. Abruf am 26.02.2014. Deutscher Wetterdienst (DWD). URL: <http://www.dwd.de>.
- Daley, R. (1991): *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series. Cambridge University Press.
- Damrath, U. (2004): „Verification against precipitation observations of a high density network – what did we learn?“ In: *Intl. Verification Methods Workshop, Montreal, Canada, 15. - 17. September*.
- Demirbas, M., M.A. Bayir, C.G. Akcora, Y.S. Yilmaz & H. Ferhatosmanoglu (2010): „Crowd-sourced sensing and collaboration using Twitter“. In: *2010 IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), Montreal, Quebec, 14.-17. Juni*.
- Dierer, S., M. Arpagaus, A. Seifert, E. Avgoustoglou, R. Dumitrache, F. Grazzini, P. Mercogliano, M. Milelli & K. Starosta (2009): „Deficiencies in quantitative precipitation forecasts: Sensitivity studies using the COSMO model“. In: *Meteorologische Zeitschrift* 18, S. 631–645.

-
- Drüe, C., W. Frey, A. Hoff & T. Hauf (2008): „Aircraft type-specific errors in AMDAR weather reports from commercial aircraft“. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 134, S. 229–239.
- Drüe, Clemens, Thomas Hauf & Axel Hoff (2010): „Comparison of boundary-layer profiles and layer detection by AMDAR and WTR/RASS at Frankfurt Airport“. In: *Boundary-Layer Meteorology* 135, S. 407–432.
- EFM (2013a): *Bericht über die Flugzeugenteisung am Flughafen München in der Saison 2012/2013*. Gesellschaft für Enteisen und Flugzeugschleppen am Flughafen München mbH.
- (2013b): *Munich Airport Aircraft De-icing Plan*. Gesellschaft für Enteisen und Flugzeugschleppen am Flughafen München mbH.
- (2014): *Bericht über die Flugzeugenteisung am Flughafen München in der Saison 2013/2014*. Gesellschaft für Enteisen und Flugzeugschleppen am Flughafen München mbH.
- Ebert, E. E. (2008): „Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: A review and proposed framework“. In: *Meteorological Applications* 15, S. 51–64.
- Ellrod, G. P. (1996): „The use of GOES-8 multispectral imagery for the detection of aircraft icing regions“. In: *8th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Atlanta, Georgia, 28. Januar - 2. Februar*.
- Ewald, F., L. Bugliaro, H. Mannstein & B. Mayer (2013): „An improved cirrus detection algorithm MeCiDA2 for SEVIRI and its evaluation with MODIS“. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 6, S. 309–322.
- FAA (2009): *TALPA (Takeoff and Landing Performance Assessment) ARC (Aviation Rulemaking Committee) Recommendations*. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Office of Aviation Research.
- Feingold, G., W. R. Cotton, S. M. Kreidenweis & J. T. Davis (1999): „The impact of giant cloud condensation nuclei on drizzle formation in stratocumulus: Implications for cloud radiative properties.“ In: *Journal of Atmospheric Science* 56, S. 4100–4117.
- Forster, C. & A. Tafferner (2012): „Nowcasting thunderstorms for Munich Airport“. In: *DLR-Forschungsbericht 2012-02 The DLR Project Weather & Flying - Final Report*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Physik der Atmosphäre, S. 32–45.
- Frick, C. & H. Wernli (2012): „A case study of high-impact wet snowfall in Northwest Germany (25-27 November 2005): Observations, dynamics, and forecast performance“. In: *Weather and Forecasting* 27, S. 1217–1234.
- Friedrich, A., G. Lux & S. Stummvoll (2013): *Messinstrumente der Meteorologie - Wetterradar in Deutschland*. Deutscher Wetterdienst (DWD).
- Fujiyoshi, Y., T. Endoh, T. Yamada, K. Tsuboki, Y. Tachibana & G. Wakahama (1990): „Determination of a Z-R relationship for snowfall using a radar and high sensitivity snow gauges“. In: *Journal of Applied Meteorology* 29, S. 147–152.
- Ganti, R., F. Ye & H. Lei (2011): „Mobile crowdsensing: Current state and future challenges“. In: *IEEE Communications* 49/11, S. 32–39.
-

- Gencer, C., E. Kizilkaya & C. Karahan (2010): „An algorithm predicting upper level icing potential by Fuzzy Set theory and an application with its algorithm for Turkey“. In: *The Open Industrial & Manufacturing Engeneering Journal* 3, S. 7–12.
- Geresdi, I., R. Rasmussen, W. Grabowski & B. Bernstein (2005): „Sensitivity of freezing drizzle formation in stably stratified clouds to ice processes“. In: *Meteorology and Atmospheric Physics* 88, S. 91–105.
- Gerz, T., K. Dengler, A. Tafferner & F. Holzäpfel (2012a): „Limited area numerical weather prediction“. In: *DLR-Forschungsbericht 2012-02 The DLR Project Weather & Flying - Final Report*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, S. 58–64.
- Gerz, T., C. Forster & A. Tafferner (2012b): „Situational awareness about thunderstorms on-board an aircraft“. In: *DLR-Forschungsbericht 2012-02 The DLR Project Weather & Flying - Final Report*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Physik der Atmosphäre, S. 184–191.
- Gesell, G. (1989): „An algorithm for snow and ice detection using AVHRR data. An extension to the APOLLO software package“. In: *International Journal of Remote Sensing* 10, S. 897–905.
- Ghandour, R., A. Victorino, M. Doumiati & A. Charara (2010): „Tire/Road friction coefficient estimation applied to road safety“. In: *18th Mediterranean Conference on Control & Automation, Marrakech, Marocco, 23.-25. Juni*.
- Ghirardelli, J. E. & B. Glahn (2010): „The meteorological development laboratory’s aviation weather prediction system“. In: *Weather and Forecasting* 25, S. 1027–1051.
- Glahn, H. R. & D. A. Lowry (1972): „The use of Model Output Statistics (MOS) in objective weather forecasting“. In: *Journal of Applied Meteorology* 11, S. 1203–1211.
- Golding, B. W. (1998): „Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts“. In: *Meteorological Applications* 5, S. 1–16.
- Guan, H., S. G. Cober & G. A. Isaac (2001): „Verification of supercooled cloud water forecasts with in situ aircraft measurements“. In: *Weather and Forecasting* 16, S. 145–155.
- Gultepe, I., G. A. Isaac & S. G. Cober (2001): „Ice crystal number concentration versus temperature for climate studies“. In: *International Journal of Climatology* 21, 1281–1302.
- HYDS (2014). Abruf am 15.05.2014. Hydro Meteorological Innovative Solutions. URL: <http://www.hyds.es/>.
- Hadjimichael, M., A. P. Kuciauskas, P. M. Tag, R. L. Bankert & J. E. Peak (2002): „A meteorological fuzzy expert system incorporating subjective user input“. In: *Knowledge and Information Systems* 462, S. 350–369.
- Hagen, M. (2012): „Observation instruments for wintry weather“. In: *Wetter&Fliegen Final Colloquium, Flughafen München, 14.-15. März*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Physik der Atmosphäre.

-
- (2014a): *DLR Micro Rain Radar MRR-2 and Parsivel Disdrometer at Manching/Ingolstadt Airport (365m MSL)*. Abruf am 22.05.2014. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Physik der Atmosphäre. URL: www.pa.op.dlr.de/poldirad/mrringo.html.
 - (2014b): *DLR Micro Rain Radar MRR-2 and Parsivel Disdrometer at Munich Airport (445m MSL)*. Abruf am 22.05.2014. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Physik der Atmosphäre. URL: www.pa.op.dlr.de/poldirad/mrrmuc.html.
 - (2014c): *POLDIRAD - The polarization diversity doppler radar at DLR Oberpfaffenhofen*. Abruf am 22.05.2014. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Physik der Atmosphäre. URL: www.pa.op.dlr.de/poldirad.
- Hagen, M. & A. Dalphinet (2012): „Identification of snow and rain at the surface using polarimetric radar“. In: *16th International Conference on Clouds and Precipitation, Leipzig, 30. Juli - 3. August*.
- Haiden, T., A. Kann, C. Wittmann, G. Pistotnik, B. Bica & C. Gruber (2011): „The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) system and its validation over the Eastern Alpine region“. In: *Weather and Forecasting* 26, S. 166–183.
- Hansen, B. K. (1996): *Fuzzy Logic and linear programming find optimal solutions for meteorological problems*. Technical University of Nova Scotia.
- (1997): „SIGMAR: A fuzzy expert system for critiquing marine forecasts“. In: *AI Applications* 11, S. 59–68.
 - (2007): „A Fuzzy Logic-based analog forecasting system for ceiling and visibility“. In: *Weather and Forecasting* 22, S. 1319–1330.
- Hauf, T. (1993): „An in-situ system for warning of icing conditions“. In: *Preprints of 5th International Conference on Aviation Weather Systems, Vienna, Virginia, 2. - 6. August*.
- Hauf, T. & R. Brown (1998): *Meteorological analysis of icing events*. Techn. Ber. EURICE.
- Hauf, T. & F. Schröder (1998): „Supercooled large drops and aircraft icing. Results from research flights in Germany, March 1997“. In: *8th International Workshop on Atmospheric Icing on Structures, Reykjavik, 8. - 11. Juni*, S. 67–71.
- (2006): „Aircraft icing research flights in embedded convection“. In: *Meteorology and Atmospheric Physics* 91, S. 247–265.
- Hauf, T., F. Schröder & A. Tafferner (1999): „Observation and forecasting of supercooled large drops and aircraft icing in convective cells embedded in a stratus cloud“. In: *The 8th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Dallas, Texas, 10. - 15. Januar*.
- Hauf, T., U. Schumann & H. Leykauf (2002): „Aviation and Weather - a new initiative in Germany“. In: *Range & Aerospace Meteorology, Portland, Oregon, 13. - 16. Mai*.
- Hauf, T., H. Leykauf & U. Schumann (2004): „Luftverkehr und Wetter - Statuspapier 2004“. In: *Project Report, DLR-Mitteilung 2004-2*, S. 59.
-

- Hellendoorn, H. & C. Thomas (1993): „Defuzzification in fuzzy controllers“. In: *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 1, S. 109–123.
- Helms, D., K. L. Johnston, G. Sanger, B. Taubvurtzel, R. A. Petersen, A. Homans & A. Hoff (2009): „Testing and deployment of the Water Vapor Sensing System II“. In: *25th Conference on International Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography and Hydrology, Phoenix, Arizona, 10. - 15. Januar*.
- Höller, H., V. N. Bringi, J. Hubbert, M. Hagen & P. F. Meischner (1994): „Life cycle and precipitation formation in a hybrid-type hailstorm revealed by polarimetric and doppler radar measurements“. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 51, S. 2500–2522.
- Hoffman, H.-E. & J. Demmel (1990): „Analysis of three icing test flights reaching the aircraft-referred icing degree severe“. In: *DLR-Forschungsbericht*. Rep. 90-34. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 114pp.
- Hoffmann, H.-E. & R. Roth (1989): „Cloudphysical parameters in dependence on height above cloud base in different clouds“. In: *Meteorology and Atmospheric Physics* 41, S. 247–254.
- Houze, R. A. (1993): „Cloud Dynamics“. In: *International Geophysics Series*. Bd. 53. Academic Press Inc.
- Huang, G.-J., V. N. Bringi, R. Cifelli, D. Hudak & W. A. Petersen (2010): „A methodology to derive radar reflectivity–liquid equivalent snow rate relations using C-Band radar and a 2D video disdrometer“. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 27, S. 637–651.
- Huffman, G. J. & G. A. Norman (1988): „The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation“. In: *Monthly Weather Review* 116, S. 2172–2182.
- ICAO (2000): *Manual of Aircraft Ground De-Icing/Anti-Icing Operations*. 2. Aufl. International Civil Aviation Organization.
- (2002): *Airport Service Manual Part 2 Pavement Surface Conditions*. 4. Aufl. International Civil Aviation Organization.
- IDC (2014): *Absatz von Smartphones in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2013 (in Millionen Stück)*. Zitiert nach de.statista.com; Abruf am 10.01.2014. International Data Corporation, European Information Technology Observatory, IDATE. URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/77637/umfrage/absatzmenge-fuer-smartphones-in-deutschland-seit-2008/>.
- Imai, I., M. Fujiwara, I. Ichimura & Y. Toyama (1955): „Radar reflectivity of falling snow“. In: *Papers in Meteorology and Geophysics* 6, S. 130–139.
- Imhof, H. & M. Hagen (2012): *Praktikumsbericht*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- IndustryStock (2013): *Nicht ohne mein Handy*. Abruf am 10.01.2014. IndustryStock.com. URL: <http://www.industrystock.de/pressenews/de/2013/9/24>.

- Isaac, G. A., S. G. Cober, J. W. Strapp, A. V. Korolev, A. Tremblay & D. L. Marcotte (2001): „Recent Canadian research on aircraft in-flight icing“. In: *Canadian Aeronautics and Space Journal* 47, S. 9.
- Isaac, G. A., M. Bailey, S. G. Cober, N. Donaldson, N. Driedger, A. Glazer, I. Gultepe, D. Hudak, A. Korolev, J. Reid, P. Rodriguez & J. W. Strapp (2006): „Airport Vicinity Icing and Snow Advisor (AVISA)“. In: *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 9.-12. Januar*.
- Isaac, G. A., M. Bailey, F. S. Boudala, W. R. Burrows, S. G. Cober, R. W. Crawford, N. Donaldson, I. Gultepe, B. Hansen, I. Heckman, L. X. Huang, A. Ling, J. Mailhot, J. A. Milbrandt, J. Reid & M. Fournier (2012): „The Canadian Airport Nowcasting System (CAN-Now)“. In: *Meteorological Applications* 21, S. 30–49.
- Johnston, E. C. (1995): „Updated satellite technique to forecast heavy snow“. In: *Weather and Forecasting* 10, S. 219–228.
- Kain, J. S., S. M. Goss & M. E. Baldwin (2000): „The melting effect as a factor in precipitation-type forecasting“. In: *Weather and Forecasting* 15, 700–714.
- Kanjo, E., J. Bacon, D. Roberts & P. Landshoff (2009): „MobSens: Making Smart Phones Smarter“. In: *IEEE Pervasive Computing* 8, S. 50–57.
- Keil, C. & G. C. Craig (2007): „A displacement-based error measure applied in a regional ensemble forecasting system“. In: *Monthly Weather Review* 135, 3248–3259.
- Keis, F. (2010): „Die Temperatur- und Niederschlagsmessungen in München“. Diplomarbeit. Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Keis, F. & A. Tafferner (2014): „Nowcasting von Winterwetter am Flughafen München“. In: *promet* 39.
- Keis, F. & K. Wiesner (2014): „Participatory sensing utilized by an advanced meteorological nowcasting system“. In: *IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), Singapur, 21.-24. April*.
- Köhler, M. & A. Tafferner (2013): „Thunderstorm forecasting by a fuzzy logic combination of model data“. In: *ECSS 2013 - 7th European Conference on Severe Storms, Helsinki, Finnland, 3. - 7. Juni*.
- Klir, G. & B. Yuan (1995): *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice Hall New Jersey.
- Kober, K. & A. Tafferner (2009): „Tracking and nowcasting of convective cells using remote sensing data from radar and satellite“. In: *Meteorologische Zeitschrift* 1(18), S. 75–84.
- Korolev, A. V. & G. A. Isaac (2000): „Drop growth due to high supersaturation caused by isobaric mixing.“ In: *Journal of Atmospheric Science* 57, S. 1675–1685.
- Korolev, A. V., G. A. Isaac, S. G. Cober, J. W. Strapp & J. Hallett (2003): „Microphysical characterization of mixed-phase clouds“. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 129, S. 39–65.

- Krebs, W., H. Mannstein, L. Bugliaro & B. Mayer (2007): „Technical note: A new day- and night-time Meteosat Second Generation Cirrus Detection Algorithm MeCiDA“. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 7, S. 6145–6159.
- Kriebel, K. T. (1989): „Cloud liquid water path derived from AVHRR data using APOLLO“. In: *International Journal of Remote Sensing* 10, S. 723–729.
- Kuk, B., H. Kim, J. Ha, H. Lee & G. Lee (2012): „A Fuzzy Logic method for lightning prediction using thermodynamic and kinematic parameters from radio sounding observations in South Korea“. In: *Weather and Forecasting* 27, 205–217.
- Lackman, G. M., K. Keeter, L. G. Lee & M. B. Ek (2002): „Model representation of freezing and melting precipitation: Implications for winter weather forecasting“. In: *Weather and Forecasting* 17, S. 1016–1033.
- Lane, N.D., E. Miluzzo, H. Lu, D. Peebles, T. Choudhury & A.T. Campbell (2010): „A survey of mobile phone sensing“. In: *IEEE Communications* 48/9, S. 140–150.
- Lauri, T., J. Koistinen & D. Moisseev (2012): „Advection-based adjustment of radar measurements“. In: *Monthly Weather Review* 140, S. 1014–1022.
- Lee, T. F., F. J. Turk & K. Richardson (1997): „Stratus and fog products using GOES-8-9 3.9- μm data“. In: *Weather and Forecasting* 12, S. 665–677.
- Leifeld, C. (2004): „Weiterentwicklung des Nowcastingsystems ADWICE zur Erkennung vereisungsgefährdeter Lufträume“. In: *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 224, S. 118.
- Levitas, D. (2013): *Always Connected - How Smartphones And Social Keep Us Engaged*. International Data Corporation (IDC).
- Levizzani, V., S. Laviola & E. Cattani (2011): „Detection and measurement of snowfall from space“. In: *Remote Sensing* 3, S. 145–166.
- Libbrecht, K. G. (2005): „The physics of snow crystals“. In: *Reports on Progress in Physics* 68, S. 855–895.
- Little, A. D. (2010): *Mobile Applications in Germany*. Zitiert nach de.statista.com; Abruf am 10.01.2014. IP Deutschland. URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/173037/umfrage/auf-smartphones-genutzte-apps-nach-themen/>.
- Liu, H. & V. Chandrasekar (2000): „Classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurements: Development of Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy systems, and in situ verification“. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 17, S. 140–164.
- MEDUSA (2014): *Meteorological Decision Support System for Aviation*. Abruf am 15.05.2014. URL: <http://www.medusa-fp7.eu>.
- METEK (2009): *MRR - Physical Basics*. Meteorologische Messtechnik GmbH.
- MUC (2012): *Snow Removal Guidelines for Munich Airport*. Flughafen München. – (2013): *Flughafen München - Zahlen und Fakten 2012/2013*. Flughafen München GmbH.

-
- (2014): *Sicher abheben auch im Winter - Wir machen Flugzeuge startklar*. Ab-ruf am 19.02.2014. Flughafen München GmbH. URL: <http://www.munich-airport.de/de/micro/efm/dienstleistungen/enteisen1>.
- Maisonneuve, N., M. Stevens, M. E. Niessen & L. Steels (2009): „NoiseTube: Measuring and mapping noise pollution with mobile phones“. In: *Information Technologies in Environmental Engineering*. Hrsg. von I. N. Athanasiadis, A. E. Riz-zoli, P. A. Mitkas & J. M. Gómez. Environmental Science and Engineering. Springer Berlin Heidelberg, S. 215–228.
- Malberg, H. (2002): *Meteorologie und Klimatologie*. 4. Aufl. Springer-Verlag.
- Mannstein, H., R. Meyer & P. Wendling (1999): „Operational detection of contrails from NOAA-AVHRR-data“. In: *International Journal of Remote Sensing* 20, S. 1641–1660.
- Mannstein, H., A. Brömser & L. Bugliaro (2010): „Ground-based observations for the validation of contrails and cirrus detection in satellite imagery“. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 3, S. 655–669.
- Marwitz, J. D., M. K. Politovich, B. C. Bernstein, F. M. Ralph, P. J. Neiman, R. Ashenden & J. Bresch (1997): „Meteorological conditions associated with the ATR-72 aircraft accident near Roselawn, Indiana, on 31 October 1994“. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, S. 41–52.
- McCann, D. W. (1997): „Five ways to produce supercooled drizzle drops“. In: *7th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, Long Beach, California, 2.-7. Februar*.
- McDonough, F. & B. C. Bernstein (1999): „Combining satellite, radar, and surface observations with model data to create a better aircraft icing diagnosis“. In: *8th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, Dallas, Texas, 10.-15. Januar*.
- McDonough, F., B. Bernstein, M. Politovich & C. Wolff (2004): „The Forecast Icing Potential (FIP) algorithm“. In: *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 5.-8. Januar*.
- Meerkötter, R. & L. Bugliaro (2009): „Diurnal evolution of cloud base heights in convective cloud fields from MSG/SEVIRI data“. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, S. 1767–1778.
- Misra, A. (2014): „Invited Talk: Participatory Sensing in Action for Urban Lifestyle Applications“. In: *IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), Singapur, 21.-24. April*.
- Mitra, S. K., O. Vohl, M. Ahr & H. R. Pruppacher (1990): „A wind tunnel and theoretical study of the melting behavior of atmospheric ice particles. IV: Experiment and theory for snow flakes“. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 47, S. 584–591.
- Mohr, C., I. Alberts, M. Masbou & A. Bott (2009): *Forschungs- und Entwicklungs-vertrag - Nebelbildung am Flughafen München: Klimatologie und Modellierung*. Universität Bonn - Meteorologisches Institut.

- Mueller, C., T. Saxen, R. Roberts, J. Wilson, T. Betancourt, S. Dettling, N. Oien & J. Yee (2003): „NCAR Auto-Nowcast system“. In: *Weather and Forecasting* 18, S. 545–561.
- Murtha, J. (1995): „Applications of Fuzzy Logic in operational meteorology“. In: *Scientific Services And Professional Development Newsletter*. Canadian Forces Weather Service, S. 42–54.
- NTSB (1988): *Aircraft accident report - Continental Airlines, INC., Flight 1713 McDonnell Douglas DC-9-14, N626TX Stapleton International Airport Denver, Colorado, November 15, 1987. Report No. NTSB/AAR-88/09*. National Transportation Safety Board.
- Ott (2014): *Operating instructions - Present Weather Sensor Parsivel*. Ott Mess-technik GmbH & Co. KG.
- Özger, M., A. K. Mishra & V. P. Singh (2012): „Long lead time drought forecasting using a wavelet and Fuzzy Logic combination model: A case study in Texas“. In: *Journal of Hydrometeorology* 13, 284–297.
- Park, S., R. Sanchez-Diezma, F. Keis & T. Gerz (2012): „Nowcasting near-ground winter precipitation for aviation: A simple approach based on radar observation and NWP model outputs“. In: *ERAD 2012 - The Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Toulouse, France, 25.-29. Juni*.
- Pobanz, B. M., J. D. Marwitz & M. K. Politovich (1994): „Conditions associated with large-drop regions“. In: *Journal of Applied Meteorology* 33, S. 1366–1372.
- Politovich, M. K. (1989): „Aircraft icing caused by large supercooled droplets“. In: *Journal of Applied Meteorology* 28, S. 856–868.
- Politovich, M. K. & B. C. Bernstein (1995): „Production and depletion of supercooled liquid water in a Colorado winter storm“. In: *Journal of Applied Meteorology* 34, S. 2631–2648.
- Pruppacher, H. R. & J. D. Klett (1997): *Microphysics of Clouds and Precipitation*. 2. Aufl. Kluwer Academic Publishers.
- Ramer, J. (1993): „An empirical technique for diagnosing precipitation type from model output“. In: *Fifth International Conference on Aviation Weather Systems*. American Meteorological Society.
- Rana, R. K., C. T. Chou, S. S. Kanhere, N. Bulusu & W. Hu (2010): „Ear-phone: An end-to-end participatory urban noise mapping system“. In: *Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, Stockholm, Sweden, 12.-15. April*.
- Rasmussen, R. & J. A. Cole (2002): *How snow can fool pilots*. National Center for Atmospheric Research (NCAR).
- Rasmussen, R., M. Politovich, J. Marwitz, W. Sand, J. McGinley, J. Smart, R. Pielke, S. Rutledge, D. Wesley, G. Stossmeister, B. Bernstein, K. Elmore, K. Powell, N. Westwater and B. Stankov & D. Burrows (1992): „Winter Icing and Storms Project (WISP)“. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 73, S. 951–974.

-
- Rasmussen, R., A. Crook & C. Kessinger (1993): „Snow-band formation and evolution during the 15 November 1987 aircraft accident at Denver Airport“. In: *Weather and Forecasting* 8, S. 453–480.
- Rasmussen, R., B. C. Bernstein, M. Murakami, G. Stossmeister, J. Reisner & B. Stankov (1995): „The 1990 Valentine’s day arctic outbreak. Part I: Mesoscale and microscale structure and evolution of a Colorado front range shallow upslope cloud.“ In: *Journal of Applied Meteorology* 34, S. 1481–1511.
- Rasmussen, R., J. Vivekanandian, J. Cole, B. Myers & C. Masters (1999): „The estimation of snowfall rate using visibility“. In: *Journal of Applied Meteorology* 38, S. 1542–1563.
- Rasmussen, R., M. Dixon, F. Hage, J. Cole, C. Wade, J. Tuttle, S. McGettigan, T. Carty, L. Stevenson, W. Fellner, S. Knight, E. Karplus & N. Rehak (2001): „Weather Support to Deicing Decision Making (WSDDM): A winter weather nowcasting system“. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 82, S. 579–595.
- Rasmussen, R., M. Dixon, S. Vasiloff, F. Hage, S. Knight, J. Vivekanandan & M. Xu (2003): „Snow nowcasting using a real-time correlation of radar reflectivity with snow gauge accumulation“. In: *Journal of Applied Meteorology* 42, S. 20–36.
- Rauber, R. M., L. S. Olthoff, M. K. Ramamurthy & K. E. Kunkel (2000): „The relative importance of warm rain and melting processes in freezing precipitation events“. In: *Journal of Applied Meteorology* 39, S. 1185–1195.
- (2001): „Further investigation of a physically based, nondimensional parameter for discriminating between locations of freezing rain and ice pellets“. In: *Weather and Forecasting* 16, S. 185–191.
- Rauber, Robert M. & Ali Tokay (1991): „An explanation for the existence of supercooled water at the cold clouds“. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 48, S. 1005–1023.
- Reinking, R. F., S. Y. Matrosov, R. T. Brientjes & B. E. Martner (1997): „Identification of hydrometeors with elliptical and linear polarization Ka-band radar“. In: *Journal of Applied Meteorology* 36, S. 322–339.
- Reisner, J., R. Rasmussen & R. T. Brientjes (1998): „Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model“. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 124, S. 1071–1107.
- Röhner, P. & T. Hauf (2008): „Some meteorological insights on winter weather operations at two major german airports“. In: *Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover*. 64. Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMUK), S. 37.
- Richardson, M. (2012): „Storm alert: Staying ahead –automated weather alerting increases safety for the mobile population.“ In: *Meteorological Technology International* August, S. 102–104.
- Rinehart, R. E. (2004): *Radar for Meteorologists*. 5. Aufl.

- Roach, W. T. R. (1976): „On the effect of radiative exchange on the growth by condensation of a cloud or fog droplet.“ In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 102, S. 361–372.
- Rogers, R. R. & M. K. Yau (1996): *A Short Course in Cloud Physics*. 3. Aufl. Butterworth Heinemann - An Imprint of Elsevier.
- Roloff, K. (2014): „Weiterentwicklung des Warnsystems ADWICE zur Vorhersage und Diagnose von Gebieten mit Vereisungsrisiko“. Dissertation in Arbeit. Leibniz Universität Hannover.
- Roloff, K., F. Kalinka & T. Hauf (2013): „Das Vereisungswarnsystem ADWICE - Modellbeschreibung und zukünftige Modellentwicklung“. In: *DACH Meteorologentagung, Innsbruck, Austria, 2.-6. September*.
- Ross, T. J. (2010): *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 3. Aufl. Wiley.
- SARSYS (2014): *Scandinavian Airport and Road Systems AB*. Abruf am 24.02.2014. URL: <http://www.sarsys.se/>.
- Saltikoff, E. (2012): „Measuring snow with weather radar“. In: *Doppler Radar Observations - Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications*. Hrsg. von J. Bech. InTech.
- Saltikoff, E., J. Koistinen & H. Hohti (2000): „Experience of real time spatial adjustment of the Z-R relation according to water phase of hydrometeors“. In: *Physics and Chemistry of the Earth B* 25, S. 1017–1020.
- Sand, W. R., W. A. Cooper, M. K. Politovich & D. L. Veal (1984): „Icing conditions encountered by a research aircraft“. In: *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23, S. 1427–1440.
- Schickel, K. P., E. Hoffmann & K.-T. Kriebel (1992): „Identification of icing water clouds by NOAA AVHRR satellite data“. In: *Proceedings of 11th International Conference on Clouds and Precipitation, Montreal, Canada, 17. - 21. August*.
- Schmetz, J., P. Pili, S. Tjemkes, D. Just, J. Kerkmann, S. Rota & A. Ratier (2002): „An introduction to Meteosat Second Generation (MSG)“. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 83-7, S. 977–992.
- Schröder, Franz, Dieter Welte & Thomas Hauf (2000): „Airborne observations of ice accretion and aircraft performance in artificial- and natural supercooled ice clouds on Dornier 228- and 328 aircraft“. In: *ICAS Congress*.
- Schultz, P. & M. K. Politovich (1992): „Toward the improvement of aircraft-icing forecasts for the continental United States“. In: *Weather and Forecasting* 7, S. 491–500.
- Schuur, T. J., H.-S. Park, A. V. Ryzhkov & H. D. Reeves (2012): „Classification of precipitation type during transitional winter weather using the RUC model and polarimetric radar retrievals“. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51, S. 763–779.
- Simon, J. (2012): „Friction measurement and runway condition assesment - Munich Airport“. In: *Summer Winter Integrated Field Technologies (SWIFT) Conference and Trade Show, Calgary, Alberta, 17.-20. September*.

-
- Simon, Jörg (2010): „Friction measurement at Munich Airport International“. In: *Runway Friction and Aircraft Breaking - The way forward, Paris, France, 11.-12. März*.
- Smith, P. L. (1984): „Equivalent radar reflectivity factors for snow and ice particles“. In: *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23, S. 1258–1260.
- Smith, R. K. (2004): *Einführung in die Meteorologie: Teil III*. Meteorologisches Institut (MIM) Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Smith, W. L., P. Minnis, B. Bernstein & P. W. Heck (2002): „Supercooled liquid water cloud properties derived from GOES: Comparisons with in-situ aircraft measurements“. In: *10th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, Portland, Oregon, 13.-16. Mai*.
- Steinacker, R., W. Pöttschacher & M. Donninger (1997): „Enhanced resolution analysis of the atmosphere over the Alps using the Fingerprint Technique“. In: *Annalen der Meteorologie* 35, S. 235–237.
- Steinacker, R., C. Häberli & W. Pöttschacher (2000): „A transparent method for the analysis and quality evaluation of irregularly distributed and noisy observational data“. In: *Monthly Weather Review* 128, S. 2303–2316.
- Steinacker, R., M. Ratheiser, B. Bica, B. Chimani, M. Dorninger, W. Gepp, C. Lotteraner, S. Schneider & S. Tschannett (2006): „A mesoscale data analysis and downscaling method over complex terrain“. In: *Monthly Weather Review* 134, S. 2758–2771.
- Steiner, M. & J.A. Smith (1998): „Convective versus stratiform rainfall: An ice-microphysical and kinematic conceptual model“. In: *Atmospheric Research* 47–48, S. 317–326.
- Stephan, K. & C. Schraff (2008): „Improvements of the operational latent heat nudging scheme used in COSMO-DE at DWD“. In: *COSMO Newsletter* 9, S. 7–11.
- Stephens, G. L. & C. D. Kummerov (2007): „The remote sensing of clouds and precipitation from space: A review“. In: *Journal of the Atmospheric Sciences - Special Section* 64, S. 3742–3765.
- Stephenson, D. B. (2000): „Use of the odds ratio for diagnosing forecast skill“. In: *Weather and Forecasting* 15, S. 221–232.
- Steuernagle, J., K. Roy & D. Wright, Hrsg. (2002): *Aircraft Icing*. Safety Advisor. AOPA Air Safety Foundation.
- Stevens, B. (2005): „Atmospheric moist convection“. In: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33, S. 605–643.
- (2010): *Twelve Lectures on Cloud Physics*. Max Planck Institute for Meteorology - University of Hamburg.
- Stewart, R. E. (1985): „Precipitation types in winter storms“. In: *Pure and Applied Geophysics* 123, S. 597–609.
- (1992): „Precipitation types in the transition region of winter storms“. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 73, S. 287–296.

- Stewart, R. E. & P. King (1987): „Freezing precipitation in winter storms“. In: *Monthly Weather Review* 115, S. 1270–1279.
- Stich, D. (2013): „Convection initiation: Detection and nowcasting with multiple data sources“. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Stich, D., C. Forster & A. Tafferner (2013): „Object-based fuzzy logic fusion of multiple data sources for nowcasting of CI“. In: *ECSS 2013 - 7th European Conference on Severe Storms, Helsinki, Finland, 3. - 7. Juni*.
- Strapp, J. W., R. A. Stuart & G. A. Isaac (1996): „A canadian climatology of freezing precipitation and a detailed study using data from St. John’s, Newfoundland“. In: *Proceedings of FAA International Conference on Aircraft In-Flight Icing, Springfield, Virginia, 6.-8. Mai*.
- Stuart, R. A. & G. A. Isaac (1999): „Freezing precipitation in Canada“. In: *Atmosphere-Ocean* 37, S. 87–102.
- Tafferner, A. & C. Forster (2013): *WxFUSION*. Abruf am 12.07.2013. URL: www.wxfusion.com.
- Tafferner, A. & F. Keis (2012): „Nowcasting winter weather at Munich airport“. In: *DLR-Forschungsbericht 2012-02 The DLR Project Weather & Flying - Final Report*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Physik der Atmosphäre, S. 46–57.
- Tafferner, A., T. Hauf & T. Hafner (1998): „Diagnosis of icing and nowcasting for aviation“. In: *EGS XII General Assembly, Nice, France, 20. - 24. April*.
- Tafferner, A., T. Hauf, C. Leifeld, T. Hafner, H. Leykauf & U. Voigt (2003): „AD-WICE: Advanced Diagnosis and Warning system for aircraft ICing Environments“. In: *Weather and Forecasting* 18, S. 184–203.
- Tafferner, A., C. Forster & T. Gerz (2012): „Concatenating weather monitoring and forecast: The WxFUSION concept“. In: *DLR-Forschungsbericht 2012-02 The DLR Project Weather & Flying - Final Report*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Physik der Atmosphäre, S. 25–31.
- Theriault, J. M. & R. E. Stewart (2007): „On the effects of vertical air velocity on winter precipitation types“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7, S. 231–242.
- (2010): „A parameterization of the microphysical processes forming many types of winter precipitation“. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 67, S. 1492–1508.
- Theriault, J. M., R. E. Stewart, J. A. Milbrandt & M. K. Yau (2006): „On the simulation of winter precipitation types“. In: *Journal of Geophysical Research* 111, S. 11.
- Theriault, J. M., R. E. Stewart & W. Henson (2010): „On the dependence of winter precipitation types on temperature, precipitation rate, and associated features“. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49, S. 1429–1442.
- Thompson, G., R. T. Brintjes, B. G. Brown & F. Hage (1997): „Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part I: WISP94 real-time icing prediction and evaluation program“. In: *Weather and Forecasting* 12, S. 878–889.

- Thompson, G., R. Rasmussen & K. Manning (2004): „Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis“. In: *Monthly Weather Review* 132, S. 519–542.
- Tremblay, A. & A. Glazer (2000): „An improved modeling scheme for freezing precipitation forecasts“. In: *Monthly Weather Review* 128, S. 1289–1308.
- Vivekanandan, J., S. M. Ellis, R. Oye, D. S. Zrnic, A. V. Ryzhkov & J. Stranke (1999): „Cloud microphysics retrieval using S-band dual-polarization radar measurements“. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 80, S. 381–388.
- Wallace, J. M. & P. V. Hobbs (2006): *Atmospheric Science - An introductory survey*. Hrsg. von R. Dmowska, D. Hartmann & H. T. Rossby. 2. Aufl. Academic Press Elsevier.
- Wallman, C.-G. & H. Aström (2001): *Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety*. Swedish National Road und Transport Research Institute.
- Wang, Y., G. Liu, E.-K. Seo & Y. Fu (2013): „Liquid water in snowing clouds: Implication for satellite remote sensing of snowfall“. In: *Atmospheric Research* 131, 60–72.
- Wender, C. (2012): „Eiskristallwachstum aus der Gasphase auf elektrodynamisch levitierten Einzelpartikeln“. Dissertation. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- Wilks, D. S. (2006): „Statistical methods in the Atmospheric Sciences“. In: *International Geophysics Series*. Bd. 91. Academic Press, Elsevier.
- Wilson, L. J. & M. Vallee (2002): „The canadian Updateable Model Output Statistics (UMOS) system: Design and development tests“. In: *Weather and Forecasting* 17, S. 206–222.
- Wirz, M., C. Strohrmann, R. Patscheider, F. Hilti, B. Gahr, F. Hess, D. Roggen & G. Tröster (2011): „Real-time detection and recommendation of thermal spots by sensing collective behaviors in paragliding“. In: *Proceedings of 1st International Symposium on From Digital Footprints to Social and Community Intelligence, Beijing, China, 17.-21. September*.
- Zadeh, L. A. (1965): „Fuzzy Sets“. In: *Information and Control* 8, S. 338–353.
- Zerr, R. J. (1997): „Freezing rain: An observational and theoretical study“. In: *Journal of Applied Meteorology* 36, S. 1647–1661.
- Zinner, T., H. Mannstein & A. Tafferner (2008): „Cb-TRAM: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multichannel Meteosat-8 SEVIRI data“. In: *Meteorology and Atmospheric Physics* 101, S. 191–210.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde dank zahlreicher und motivierender Unterstützung im Rahmen des Projekts Wetter&Fliegen in der Abteilung Verkehrsmeteorologie des Instituts für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen verfasst. An dieser Stelle möchte ich mich vor allen Dingen bei Dr. Arnold Tafferner für seine inspirierende, motivierende und lehrreiche Betreuung während der vergangenen Jahre bedanken. Ohne seine Mitwirkung und seine Unterstützung wäre die Arbeit nicht möglich gewesen.

Außerdem gilt mein Dank Prof. Dr. George Craig und Prof. Dr. Markus Rapp für die Begutachtung der Dissertation sowie Dr. Thomas Gerz für die Möglichkeit, dieses spannende und anwendungsbezogene Thema in der Abteilung Verkehrsmeteorologie zu bearbeiten. Mein Dank gilt auch der gesamten Abteilung, insbesondere den Mitgliedern der katalanischen Reisegruppe, die selbst unter Sternen stets ein angenehmes und konstruktives Arbeitsumfeld zu schaffen wussten.

Bedanken möchte ich mich auch bei der Verkehrsleitung des Flughafens Münchens, insbesondere bei Jörg Simon, für die Möglichkeit das Forschungssystem unter realen Bedingungen zu testen, für die konstruktiven Diskussionen, für die zahlreich zur Verfügung gestellten Daten und für den inspirierenden Einblick in die alltäglichen Abläufe am Flughafen. Desweiteren möchte ich mich bedanken bei Frank Depping von der Deutschen Flugsicherung am Flughafen München und bei Hans-Dieter Saffran von der Flugwetterberatung des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen München für die konstruktive Kritik, für die Beteiligung an den Winterwetterkampagnen und für die zur Verfügung gestellten Informationen.

Meinen Dank aussprechen möchte ich auch dem Deutschen Wetterdienst, von dem die Daten für das Forschungsprojekt stammen, und bei seinen Mitarbeitern Ulrich Schättler und Thomas Hanisch, die bei der Einrichtung des Datenbankzugangs eine große Hilfe waren.

Zu guter Letzt möchte an dieser Stelle ein besonderes Dankeschön an meine Familie richten für ihre geduldige und verlässliche Unterstützung in den vergangenen Jahren sowie für die hilfreiche Korrektur und die konstruktive Kritik der Arbeit.