

Jahrgang 39 Heft 1/2

# promet

meteorologische fortbildung

## Aktuelle Aspekte der Flugmeteorologie II - Mit dem Wetter leben



**Herausgeber**

Deutscher Wetterdienst

**Hauptschriftleiter**

Dr. J. Rapp (Offenbach/M.)

**Redaktionsausschuss**

Prof. Dr. G. Adrian (Offenbach a. M.)

Prof. Dr. B. Ahrens (Frankfurt a. M.)

PD Dr. F. Berger (Lindenberg)

Prof. Dr. Ch. Bernhofer (Dresden)

Prof. Dr. B. Brümmer (Hamburg)

Prof. Dr. G. Craig (München)

Prof. Dr. S. Jones (Offenbach a. M.)

Prof. Dr. G. Groß (Hannover)

Prof. Dr. A. Macke (Leipzig)

Dr. E. Rudel (Wien)

**Technische Herausgabe (Layout)**

S. Stummvoll (DWD, Offenbach/M.)

**Fotonachweis Titelseite**

Links: Flugzeugenteisung (©Lufthansa),  
oben rechts: Hagelschaden (©Stefan, JetPhotos.Net),  
unten rechts: pc\_met (Foto: DWD).

promet erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes – Frankfurter Str. 135, 63067 Offenbach am Main. Bezugspreis pro Jahrgang im Abonnement 24,08 €, Doppelheft 13,91 €, Dreifachheft 20,87 € zuzüglich Versandkosten.

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

Für die etwa ein Jahr später erscheinende Online-Ausgabe:



**Druck**

kraus print u. media GmbH & Co. KG  
Am Angertor 11  
97618 Wülfershausen

**Bezug**

Deutscher Wetterdienst  
Fachinformationsstelle und  
Deutsche Meteorologische Bibliothek  
Frankfurter Str. 135  
63073 Offenbach a. M.

ISSN 0340-4552 (Druck)

ISSN 2194-5950 (Internet)

**Auflage:** 3 650

**Internet:** www.dwd.de/promet

**Redaktionsschluss:** 30.9.2014

**Editorial**

Liebe Leserinnen und Leser,

dieses Heft ist mit über 130 Seiten ungewöhnlich umfangreich. Es soll die Ausnahme bleiben. Aber nach dem ungewöhnlich großen Feedback auf das erste Heft zur Flugmeteorologie wollten wir Ihnen keinen Beitrag des zweiten (und letzten) Heftes vorenthalten.

Wer bestimmt eigentlich die Themen und Autoren der Hefte? Nun, dazu kommt einmal im Jahr der Redaktionsausschuss zusammen, dem der Präsident des DWD vorsitzt. Dieses Gremium schlägt nicht nur aktuelle Themen sondern auch Fachredakteure vor, die geeignet erscheinen, ein Heft mit acht oder auch zehn Beiträgen zu koordinieren. Fachredakteure haben die Aufgabe, die einzelnen Manuskripte bei potentiellen Autorinnen und Autoren einzuwerben und anschließend inhaltlich zu betreuen. Sie nehmen also maßgeblichen Einfluss auf die Themenauswahl eines Heftes.

Wenn Sie, liebe Leserinnen und Leser, also gerne einen Artikel zu einem Heft beitragen möchten, sollten Sie sich – früh genug – mit dem jeweiligen Fachredakteur, gegebenenfalls auch mit mir als Schriftleiter, in Verbindung setzen. Den Inhalt der kommenden Hefte und die dazu gehörigen Namen der Fachredakteure finden Sie in der Regel am Ende eines jeden Heftes.

Eine interessante und lohnende Lektüre wünscht Ihnen

Ihr Schriftleiter  
Jörg Rapp

## Inhalt des aktuellen Heftes

39. Jahrgang, Heft 1/2

Thema des Heftes: **Aktuelle Aspekte der Flugmeteorologie II - Mit dem Wetter leben**

Fachliche Redaktion: T. Hauf, Hannover

Fachliche Durchsicht: U. Schumann, Oberpfaffenhofen

### Kapitel

	Seite
Zu diesem Heft (T. Hauf)	3
W. RUHE	
11 Verhütung von Vogelschlägen mit Hilfe meteorologischer Informationen	4-10
T. PRENOSIL, B. STOCKHAUSEN	
12 Konzept zur meteorologischen Einsatzunterstützung für die Aufklärungsdrohne „Heron 1“	11-13
F. HOLZÄPFEL	
13 Flugzeug-Wirbelschleppen - von der Grundlagenforschung zur Anwendung	14-22
M. RASCHENDORFER, A. BARLEBEN	
14 Vorhersage fluggefährdender Turbulenz und ihre Registrierung	23-35
R. HEISE, D. ETLING	
15 Schwerewellen und Rotoren	36-44
C. FORSTER, A. TAFFERNER, H.-D. SAFFRAN	
16 Gewittervorhersage	45-54
K. ROLOFF, F. KALINKA, T. HAUF	
17 Flugzeugvereisung	55-64
K. ROLOFF, B. LESCHER	
18 Winterwetteroperationen am Beispiel des Verkehrsflughafens Frankfurt/Main	65-71
F. KEIS, A. TAFFERNER	
19 Nowcasting von Winterwetter am Flughafen München	72-79
R. STEINACKER, S. UMDASCH	
20 Die meteorologische Sichtweite	80-90
A. DIEHL, B. WEINZIERL	
21 Vulkanasche und Vorhersage: Was haben wir aus dem Ausbruch des Eyjafjallajökull 2010 gelernt?	91-103
A. HOFF, C. DRÜE, H.-R. SONNABEND	
22 Verkehrsflugzeuge als meteorologische Beobachtungssysteme	104-116
Glossar	117-128
Buchbesprechung	129
Anschriften der Autoren dieses Heftes	130-131

## Inhalt

38. Jahrgang, Heft 3/4

Thema des letzten Heftes: **Aktuelle Aspekte der Flugmeteorologie I - Grundlegendes**

Fachliche Redaktion: T. Hauf, Hannover

Fachliche Durchsicht: U. Schumann, Oberpfaffenhofen

	Seite
<b>Kapitel</b>	
Zu diesem Heft (T. Hauf)	117-118
T. HAUF, K. STURM	
1 Bedeutung und Aufgaben der Flugmeteorologie - heute und morgen	119-125
H. PÜMPEL	
2 Die Flugmeteorologie als Modell internationaler Zusammenarbeit	126-134
S. KOOS	
3 Der „Single European Sky“ und das Wetter - die Aufgaben der Flugwetterdienste im SESAR-Programm	135-142
M. KERSCHBAUM	
4 Wetter im Luftverkehrsmanagement	143-156
M. SAUER, T. GERZ	
5 Wettereinfluss auf Sicherheit und Effizienz im Luftverkehr - Analysen und Minimierungskonzepte	157-165
M. RIEDIGER	
6 Meteorologische Information für die Flugdurchführung	166-171
D. DANIEL, R. HEISE, D. THIEL	
7 Geoinformationsberatung in Einsatzgebieten der Bundeswehr	172-179
K. SIEVERS	
8 Wetterinformationen für Piloten - die Praxis	180-188
M. STREICHER	
9 Fallstudie eines wetterbedingten Flugunfalls	189-192
R. SAUSEN, S. MATTHES	
10 Einfluss des Flugverkehrs auf das Klima	193-200
Buchbesprechung	201-202
Examina im Jahr 2011	203-211
Examina im Jahr 2012	212-219
Anschriften der Autoren dieses Heftes	220

---

## Aktuelle Aspekte der Flugmeteorologie II - Mit dem Wetter leben

---

### *Zu diesem Heft*

*Unter der Überschrift „Limiting the impact of weather“ hat das Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE), eine neu geschaffene Interessensvertretung der europäischen Luftfahrt, 2001 in einer bemerkenswerten Denkschrift „European Aeronautics: A Vision for 2020“ zum Thema Wetter vermerkt: „We want to continue to reduce the weather as a disrupting factor for aircraft operations and a source of discomfort and danger during flight. We cannot control it but we need to learn to live with the elements and steadily eliminate the service disruption that they may cause.“*

*Der hier ausgesprochene Gedanke ist das Leitmotiv dieses zweiten Heftes zum Thema „Aktuelle Themen der Flugmeteorologie“. Er ist umso bemerkenswerter als die darin zum Ausdruck gekommene Einsicht, man könne eben das Wetter nicht kontrollieren, sondern man müsse damit leben und lernen damit umzugehen, zwar von jedem Bürger als vollkommen selbstverständlich angesehen wird, aber im Bereich der Luftfahrt noch nicht überall verinnerlicht ist. Die Planbarkeit jedes einzelnen Fluges und die des Gesamtsystems Luftverkehr stößt mit dem Wetter sicherheitsbedingt an seine Grenzen. Ein Gewitter kann meistens nicht unbeschadet durchflogen werden, schneebedeckte Start- und Landebahnen müssen vor Nutzung erst geräumt werden, Eis und Schnee an den Tragflächen müssen vor dem Start entfernt werden, Vulkanaschewolken sollten umflogen werden, Vögel sollten nicht in die Triebwerke gelangen, die Wirbelschleppen vorausfliegender größerer Flugzeuge sollten vermieden werden – die Liste der Wettergefahren und Risiken ist lang. Wetter ist nicht kooperativ, es kann direkt nicht gemanagt werden, seine Auswirkungen können dramatisch sein. Mehr Demut vor dem Wetter sei angesagt, so die Stimme eines Piloten in Heft I (Beitrag Sievers). Die Flugmeteorologie weiß dies, aber die nichtmeteorologischen Partner in der Luftfahrt scheinen diesen Lernprozess erst zu durchlaufen: „We need to learn to live with the elements“.*

*Die Vision 2020 gibt aber auch das Ziel vor: „to eliminate the service disruptions that they may cause“. Und genau darum geht es auch in diesem Heft. Die Atmosphäre besser zu verstehen und zum Beispiel mit neuen Beobachtungssystemen wie AMDAR genauere Daten zu erhalten, die Gefahren wie Vulkanasche, Gewitter, Vogelschlag, Winterwetter, Vereisung, Wirbelschleppen, begrenzte Sichtweite zu erkennen und Verfahren zu entwickeln, den Wettereinfluss zu minimieren. Hier gibt es erfreuliche Entwicklungen, die in diesem Heft auch dargestellt werden.*

*Thomas Hauf*

W. RUHE

# 11 Verhütung von Vogelschlägen mit Hilfe meteorologischer Informationen

Prevention of birdstrikes using meteorological information

## Zusammenfassung

Zusätzlich zur Gewährleistung der Einsatzbereitschaft der Bundeswehr wird der Flugsicherheit im Flugbetrieb große Beachtung zuteil. Kollisionen von Luftfahrzeugen mit Vögeln sind keine seltenen Ereignisse und haben das Potenzial, große Schäden sowohl humaner als auch technischer Art hervorzurufen. Zur Minimierung der Vogelschläge wurden vom Dezernat Biologie des Amtes für Geoinformationswesen der Bundeswehr Verfahren entwickelt und eingesetzt, die neben den aktiv wirkenden biologisch-ökologischen Maßnahmen auf dem eigentlichen Flugplatzgelände und in Flugplatznähe auch passiv wirkende technisch-operationelle Verfahren zur Warnung der Piloten vor Vogelmassierungen im Luftraum umfassen. Verhalten der Vögel und das Phänomen Vogelzug sind eng an meteorologische Parameter geknüpft, deren Abhängigkeiten in vielerlei Hinsicht im Rahmen der Vogelschlagverhütung genutzt werden. Die Beziehungen zwischen der Meteorologie und der Ornithologie werden bei der Vorstellung der aktuellen operationellen Verfahren als wichtige Basis dargestellt.

## Summary

Additionally to ensuring the operational readiness of the German Armed Forces (Bundeswehr) in flight operations, flight safety is an important issue. Aircraft collisions with birds are not rare events and have the potential of major damage, affecting both humans and equipment. To minimize bird strikes the Biology Section of the Bundeswehr Geoinformation Office developed methods which include not only the active-acting biological-ecological measures on the airports themselves and in the airport vicinity but also the passively acting technical and operational procedures for alerting pilots in the airspace. The behavior of birds and the phenomenon of bird migration are closely linked to specific meteorological parameters. Their dependencies are used in many ways in the context of birdstrike prevention measures. As an important basis the relationships between meteorology and ornithology are presented in combination with the current operational procedures.

## 1 Einleitung

Zusammenstöße von Luftfahrzeugen mit Vögeln, sogenannte Vogelschläge (englisch *birdstrike*) sind ein seit Beginn der Luftfahrt bekanntes Flugsicherheitsproblem. Der erste tödliche Zwischenfall eines Doppeldeckerpiloten mit einem Gänseschwarm wurde bereits vor mehr als 100 Jahren im Jahr 1912 dokumentiert. In der Bundeswehr wurde man auf die Problematik in den 1960er Jahren aufmerksam, als mit den ersten strahlgetriebenen einmotorigen Luftfahrzeugen vermehrt vogelschlagbedingte Zwischenfälle verbunden mit Schäden bis hin zu Abstürzen auftraten. Das Dezernat Biologie des damaligen Amtes für Wehrgeophysik wurde per ministeriellen Erlass, dem sogenannten „Vo-

gelschlagerrlass“ angewiesen, unter Anwendung neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse und Technologien Verfahren zur Vermeidung von Vogelschlägen im Flugbetrieb der Bundeswehr zu entwickeln und entsprechende Maßnahmen in der Bundeswehr durchzuführen. Diese Aufgabe gehört auch weiterhin, nun auf der Grundlage einer neueren Weisung des Bundesministeriums der Verteidigung, zum Aufgabenspektrum des Fachdezernates Biologie im jetzigen Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw).

Die ständig weiterentwickelten Verfahren und konsequent umgesetzten Maßnahmen zur Vermeidung von Vogelschlägen, führten im Verlauf der Jahre zu einem deutli-

chen Rückgang der Vogelschläge und konnten in den vergangenen Jahren auf etwa konstantem Niveau gehalten werden, wie die jährlich intern vorgelegten ausführlichen statistischen Auswertungen belegen (VERSCHIEDENE AUTOREN 2010). Im Mittel der letzten 10 Jahre wurden demnach jährlich 259 Vogelschläge, davon 23 mit Schäden, im Flugbetrieb der Bundeswehr registriert. Dies entspricht einer Zwischenfallrate von 15,2 Vogelschlägen pro 10 000 Flugstunden mit einer Schadensrate von 1,4 Ereignissen pro 10 000 Flugstunden. Anschaulich bedeutet dies, dass nahezu pro Einsatztag ein vogelschlagbedingter Zwischenfall und monatlich zwei Schadensfälle auftreten, deren Kosten durchaus erhebliche Summen erreichen können.

Dass Vogelschlag nicht nur ein Phänomen in der militärischen Luftfahrt ist, sondern auch die zivile Luftfahrt ebenso gefährdet, wurde einer breiten Öffentlichkeit spektakulär vor Augen geführt, als im Jahr 2009 ein Schwarm Kanadagänse in New York mit einer Verkehrsmaschine kollidierte und diese nach vollständigem Triebwerksausfall im Hudson River trotz der Gefahrenlage glücklich notlandete. Glücklicherweise blieb der Unfall ohne Personenschaden aber unter Verlust des Luftfahrzeuges. Statistiken zu Vogelschlagzwischenfällen in der Zivilluftfahrt werden von nationalen Stellen erhoben und an die International Civil Aviation Organisation (ICAO) gemeldet. Beim Design von Luftfahrzeugen werden auf deren Statistiken basierend Kriterien für die Festigkeit von Luftfahrzeugstrukturen festgelegt, zum Beispiel 1,8 kg (vergleichbar mit einem Graureiher) für einen Triebwerkseinschlag eines Einzelvogels. Als kritisch für die Beschädigung eines Flugzeugteils werden Vögel ab einer Masse von etwa 80 g (Star) angesehen, insbesondere dann, wenn sie in Schwärmen aufschlagen.

Das Problem Vogelschlag und die Handlungsstrategien zu ihrer Vermeidung lassen sich in zwei Kategorien klassifizieren:

1. Vogelschläge, die in Bodennähe, zumeist bei Start oder Landung, an einem Flugplatz (= mil) oder Flughafen (= ziv) auftreten können, sind am wirkungsvollsten mit Methoden des aktiven Biotopmanagements zu bekämpfen. Dies sind Gestaltungs- und Pflegemaßnahmen, die eine Umgebung unattraktiv für Vögel werden lassen, zumeist durch Vermeidung oder Beseitigung von Futter-, Rast- und Nistplätzen. Flankierend kommen verschiedenste Vergrämuungsmaßnahmen zum Einsatz.
2. Vogelschlägen im freien Luftraum hingegen kann am effektivsten mit den passiven Methoden der Beobachtung, Warnung und Vorhersage begegnet werden. Letzteres ist sehr viel wirkungsvoller in der militärischen Luftfahrt einsetzbar, da Flugaufträge (Zeiten, Höhen und Routen) gegebenenfalls kurzfristig geändert werden können, während in der Zivilluftfahrt dazu nur sehr geringe Möglichkeiten bestehen. Jedoch hilft auch hier zur Schadensminimierung unter Umständen allein schon die Kenntnis über ein akut

vorhandenes Gefahrenpotenzial, damit die Flugzeugbesatzung im Fall eines Vogelschlages schnell die richtigen Maßnahmen zu treffen in der Lage ist.

Mit Beginn der Bemühungen um eine Reduktion des Vogelschlagrisikos in der Bundeswehr wurde deutlich, dass wegen vielfältiger Zusammenhänge zwischen den Vogelaktivitäten und den meteorologischen Umweltbedingungen die enge Zusammenarbeit zwischen den Fachdisziplinen Meteorologie und Ornithologie sehr vorteilhaft ist und da diese in einer Organisationsstruktur vorhanden waren und auch weiterhin im ZGeoBw sind, sehr gute Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Vogelschlagverhütung vorliegen.

## 2 Vogelflugaktivität

Vögel sind im Luftraum je nach Art an unterschiedlichen Orten und Zeiten aktiv (BAUER et al. 2005). Das Verhalten von Vögeln wird dabei in hohem Maße von Wetterparametern, Wetterverlauf und Klima beeinflusst (GATTER 2000).

Hinsichtlich ihrer täglichen Aktivitätsphasen lassen sich Vögel in überwiegend tag- oder nachtaktive Vögel unterteilen. Erstere überwiegen in ihrer Anzahl deutlich. Da die allermeisten Vögel die Ruhephasen nicht an den Nahrungsplätzen verbringen, finden tageszeitabhängige lokale Pendelflüge zwischen den Nahrungs- und Rastplätzen statt. Diese Flüge erfolgen überwiegend während der Dämmerungsphasen mit Aktivitätsmaxima morgens zu Beginn der bürgerlichen Dämmerung (astronomische Definition: Der Mittelpunkt der Sonnenscheibe befindet sich 6° unter dem Horizont) und abends kurz nach Sonnenuntergang bis zum Ende der bürgerlichen Dämmerung.

Flugaktive Vögel variieren in Größe und Gewicht von wenigen Zentimetern und Gramm, zum Beispiel Goldhähnchen (9 cm, 5 g), bis zu über einem Meter Körperlänge und mehr als 10 kg, zum Beispiel Schwäne (1,5 m, 12 kg). Nahezu alle Vögel sind in der Lage, sich per Ruderflug mit aktivem Flügelschlag fortzubewegen, jedoch bevorzugen viele, insbesondere größere Arten, den Gleitflug um Aufwinde und Thermik auszunutzen und sich dadurch energieeffizient lange Zeit im Luftraum aufzuhalten und auch erstaunliche Höhen zu erreichen. Der in bisher größter Flughöhe registrierte Vogelschlag ereignete sich in 11 .300 m Höhe über der Elfenbeinküste mit einem Sperbergeier (BERTHOLD 2008). Der Motivation entsprechend werden unterschiedliche Flughöhen bevorzugt. So werden kurze Flugstrecken, zum Beispiel Nahrungsflüge zwischen Rast- und Futterplätzen, bei den meisten Vögeln in niedriger Höhe durchgeführt, während lang andauernde saisonale Flüge zwischen Sommerbrutgebieten und Überwinterungsgebieten mit Windunterstützung in größeren Höhen erfolgen können. BERTHOLD (2008) gibt eine knappe Übersicht von Zughöhen auf der Basis von Radarmessungen. Dementsprechend wurde festgestellt, dass die meisten

Züge unterhalb 2000 m über Grund erfolgen. Aber auch hohe Gebirge wie die Alpen sind für die meisten Vogelarten keine unüberwindliche Barriere. Selbst der Himalaya wird nachweislich von Streifengänsen in 7000 m bis 10 000 m Meereshöhe überflogen. Laborversuche haben bestätigt, dass sie die dort herrschenden Bedingungen ertragen können und ihre Physiologie an die geringe Sauerstoffkonzentration angepasst ist.

### 3 Phänomen Vogelzug

Unter Vogelschlaggesichtspunkten findet neben den täglichen Vogelflugaktivitäten das Phänomen Vogelzug (BERTHOLD 2008) große Beachtung, da während dieser saisonalen Wanderungsbewegungen Milliarden Zugvögel (anhand von Brutvogelerhebungen geschätzt etwa 5 Milliarden pro Zugphase) Mitteleuropa überfliegen und einfliegen.

Das Zugverhalten ist bei den Vögeln wie auch bei den meisten Lebewesen genetisch determiniert und begründet sich mit dem Drang zur Arterhaltung, wobei auf weite Sicht den großen klimatischen Änderungen des globalen Klimas und den kontinentalen Verschiebungen eine große Bedeutung zugesprochen werden muss. Das derzeitige Zugverhalten (ELPHICK 2008, BERTHOLD 2008) ist im Wesentlichen eine Folge der letzten glazialen Vereisungsphase und der noch anhaltenden Warmphase. Dadurch konnten Vögel, die während der nordhemisphärischen Vereisung nach Süden gedrängt wurden, allmählich wieder nach Norden vordringen. Wegen der langen Helligkeitsphasen und des großen Nahrungsreichtums in den hohen Breiten finden die ziehenden Arten dort sehr gute Brutbedingungen vor, zusätzlich fällt die Konkurrenz mit den Vogelarten im Überwinterungsgebiet weg. Neuere ornithologische Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Vögeln ein neues Zugverhalten schon in kurzer Zeit genetisch fixiert wird und sie sich damit rasch auf Klimatrends und andere Umwelt- und Nahrungsbedingungen einstellen können (BERTHOLD 2008).

Die einzelnen Vogelarten unterscheiden sich recht deutlich in ihrem Zugverhalten. In Bezug auf Mitteleuropa lassen sich zwei Hauptgruppen unter den Zugvögeln unterscheiden: Zahlenmäßig am häufigsten sind die Kurzstreckenzieher, die maximal bis zur Sahara ziehen. Dazu gehören zum Beispiel die Drosseln, der Kranich und die meisten Greifvögel. Die zweite Gruppe umfasst die Langstreckenzieher, die über die Sahara hinweg noch weiter nach Süden ziehen. Zu diesen gehören zum Beispiel die Schwalben und die Störche. Von letzteren sind jedoch aufgrund der oben genannten Anpassungen an andere Klima- und Umweltbedingungen nur noch Teilpopulationen Langstreckenzieher, viele auf der westlichen Zugroute über Gibraltar sind Kurzstreckenzieher und einige in Mitteleuropa aufgezogene Vögel sind inzwischen sogenannte Standvögel, die keine regelmäßigen Wanderungen mehr durchführen.

Anhand 30-jähriger Beobachtungen des Vogelzuges am Nordrand der Schwäbischen Alb stellt GATTER (2000) fest, dass die Wetterabhängigkeit des Zuges direkt sichtbar ist. Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass der wichtigste Wetterfaktor der Wind ist, da dieser unmittelbaren Einfluss auf den Energieverbrauch im Flug hat. Niederschlag wirkt in erster Linie zugunterdrückend, kann aber vor oder nach einem Niederschlagsgebiet in Verbindung mit dem Durchzug einer Front zugstimulierend wirken. Die Temperatur übt keinen so direkten Einfluss aus, wirkt sich aber indirekt auf das Nahrungsangebot und damit auf die Zugbereitschaft aus. Weniger bestimmend auf das Zugeschehen sind auch die Bewölkung und der Luftdruck, können aber in Verbindung mit anderen Parametern einen jeweiligen partiellen Beitrag leisten. Langanhaltendes gutes Zugwetter führt im Allgemeinen nur an den ersten Tagen zu überdurchschnittlichem Zug.

Mit Windunterstützung können Vögel bei Zuggeschwindigkeiten von 50 bis 100 km/h über Grund erstaunliche Strecken zurücklegen. BERTHOLD (2008) berichtet aus der Literatur von Ringfunden, demzufolge Gänse, Watvögel und Drosseln in 24 Stunden Strecken von 600 bis 1000 km in 24 Stunden und 3000 bis 5000 km in 60 bis 65 Stunden zurücklegten. Non-Stop-Flugleistungen können selbst bei Kleinvögeln etwa 1000 km betragen.

Das Zugverhalten der Langstreckenzieher orientiert sich terminlich im starken Maße an den astronomischen Verhältnissen, welches durch relativ konstante Ankunfts- und Abflugzeiten erkennbar ist. Bei den Kurzstreckenziehern hingegen sind diese zusätzlich auch deutlich vom aktuellen Wetter abhängig. So zeigen die Beobachtungsdaten, dass zuweilen nach längeren ungünstigen Wetterphasen, zum Beispiel bei Niederschlägen und Gegenwind, eine mengenmäßige Konzentration des Zuges („Zugstautendung“) stattfindet.

#### 3.1 Vogelzugbeobachtung

Wie auch in der Meteorologie bildet die Beobachtung des Phänomens die Grundlage für den Einsatz der Verfahren zur Warnung des Flugbetriebes vor Konzentrationen von Vögeln im Luftraum und zur Vorhersage des zu erwartenden Vogelschlagrisikos. Die Vogelbeobachtung unterliegt zum Teil selber den jeweils herrschenden meteorologischen Einflüssen.

Visuelle Beobachtungen des Vogelzuges werden von Wetterbeobachtern im Geoinformationsdienst der Bundeswehr gemäß einer Besonderen Anweisung und im Deutschen Wetterdienst entsprechend des vergleichbar aufgebauten ORNOB-Meldeschlüssels durchgeführt und in das Wetterdatennetz eingesteuert. Sie unterscheiden sich von einem ornithologischen Monitoring dadurch, dass sie lediglich auf die Erfassung von ausgewählten Vogelarten, Mindestanzahlen und Flughöhen abzielen. Diese Vogelarten sind so ausgewählt, dass sie Indikatoren für großräumigen Vogelzug und der davon ausgehenden Gefährdung des Flugbe-

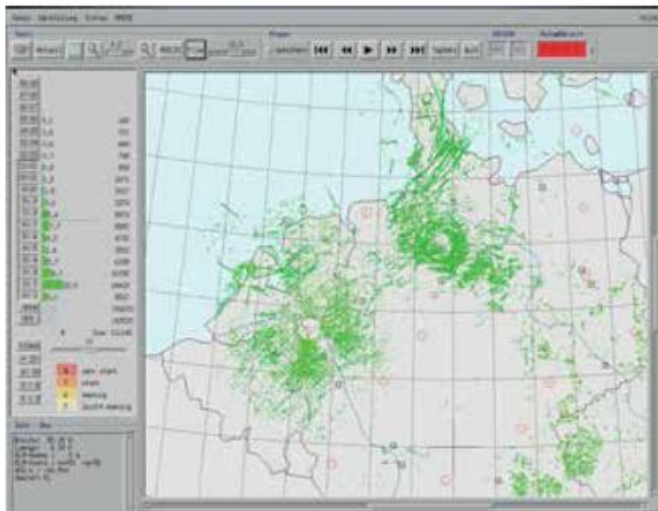


Abb. 11-1: Vogelzuganalyse am 18.03.2013, 12:00 UTC, der über das militärische Radardatennetz empfangenen Primärradarechos der militärischen 3D-Luftraumüberwachungs-Radarsensoren. Dargestellt sind einstündig integrierte Radarechos bewegter Objekte ohne Transpondererkennung (Lfz). Radarechos sind gemäß der Höhenverteilung (linke Seite) in 1000 ft-Intervalle klassifiziert.

etriebes sind. Die Erfassung ist in erster Linie von den Sichtbedingungen abhängig, bei Dunkelheit nicht durchführbar und naturgemäß sehr punktuell. Trotzdem geben sie wichtige Hinweise auf das aktuelle Zugeschehen, insbesondere auf das aktuell ziehende Artenspektrum. Neuere Methoden der Vogelzugbeobachtung bedienen sich der Satellitentelemetrie über GPS-Sender und Transponder, sind aber in erster Linie für die Grundlagenforschung ausgelegt, da sie sehr aufwändig sind und nur einzelne Individuen erfassen. Mittels Infrarottechnik der neueren Generation sind Vögel sowohl fliegend als auch rastend je nach Umgebungstemperaturbedingungen in günstigen Fällen bis über 5 km Entfernung erfassbar, eine gute Möglichkeit für die Flugfeldüberwachung (RUHE 2008).

Wesentlich vorteilhafter für die großräumigere Erfassung ist die Nutzung der Radartechnik, die bereits in vielfältiger Form in der Bundeswehr eingeführt und nutzbar ist. Großraumüberwachungsradargeräte der Luftverteidigung (3D-Erfassung) und zunehmend Flugsicherungsradargeräte (2D-Erfassung) an Flugplätzen der Bundeswehr (RUHE 2008) speisen kontinuierlich Daten in das militärische Radardatennetz ein. Seit etwa zwei Jahren verfügt das ZGeoBw über einen Netzknotenrechner zu diesem Realzeitdatennetz, über den die relevanten vogelzugspezifischen Daten aus dem Radardatenstrom selektiert und weiterverarbeitet werden sowie gegebenenfalls in Warnungen

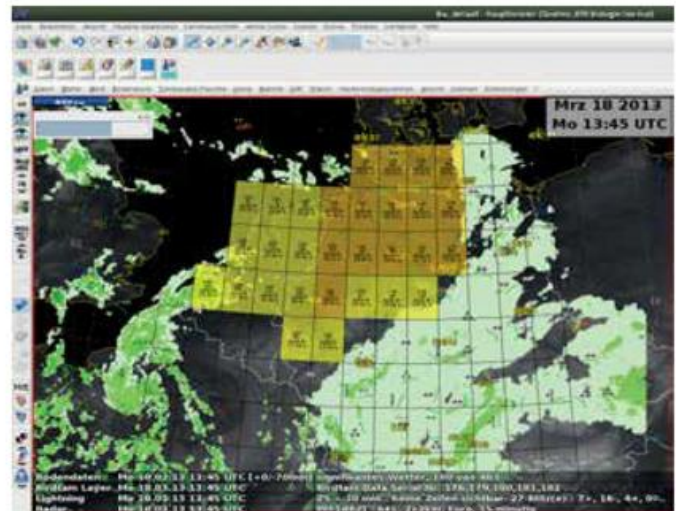


Abb. 11-2: BIRD TAM-Warnlage am 18.03.2013, 13:45 UTC, im Vergleich zur vogelzugrelevanten meteorologischen Lage. Darstellung der GGS-Ninjo-BIRD TAM- und Niederschlagsradar-Layer sowie signifikantes Wetter und Bodenwinde.

münden (Abb. 11-1 und 11-2). Prinzipiell eignet sich auch das Wetterradar zur Vogelzugerfassung und Quantifizierung bei entsprechender Kalibrierung. Entsprechende Algorithmen wurden vom niederländischen Wetterdienst KNMI in jüngster Zeit entwickelt (DOCTER et al. 2009). Der Unterschied zum Flugsicherungsradar besteht darin, dass in diesem eine Ortung von bewegten Objekten im Luftraum vorgenommen wird, während mit dem Wetterradar die Intensität der Rückstreuung aller Objekte in den jeweiligen Radarauflösungszellen gemessen wird. Eine weitere prinzipielle Möglichkeit der Vogelzugerfassung bieten auch Windprofiler, die sehr gute Messungen der Höhenverteilung hoher Vogelzugintensitäten liefern (ENGELBART et al. 1998). Da die Erkennung von Vogelzügen bisher nicht eine primäre Aufgabe dieser Systeme ist, sondern diese eher als Störungen aufgefasst werden, wird versucht, durch Filteralgorithmen die Echos von Vogelschwärmen

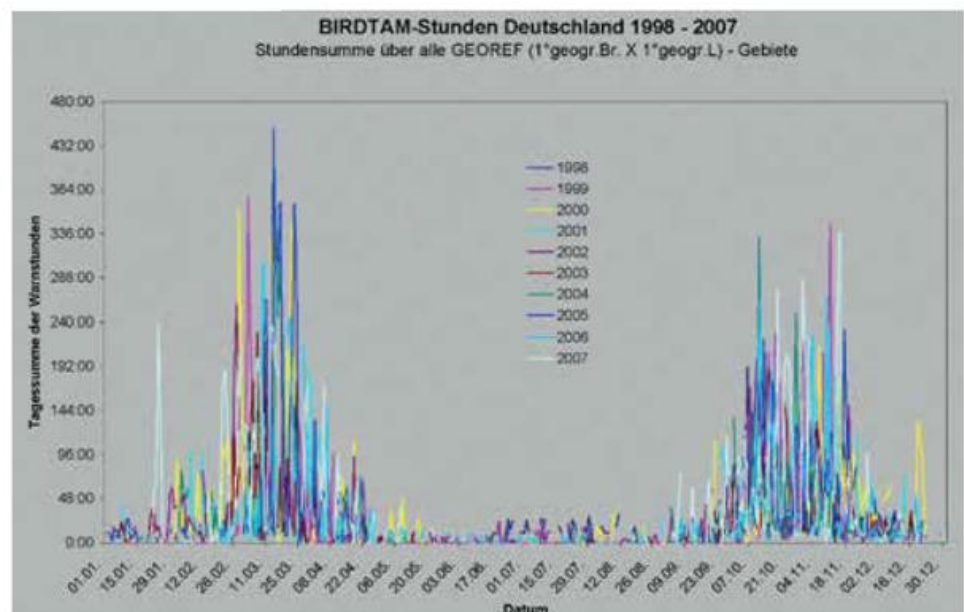


Abb. 11-3: Jahresmuster der Intensitäten des Vogelzuges der Jahre 1998 – 2007 für Deutschland anhand der täglichen Stundensummen aktiver BIRD TAM und Warngebiete.

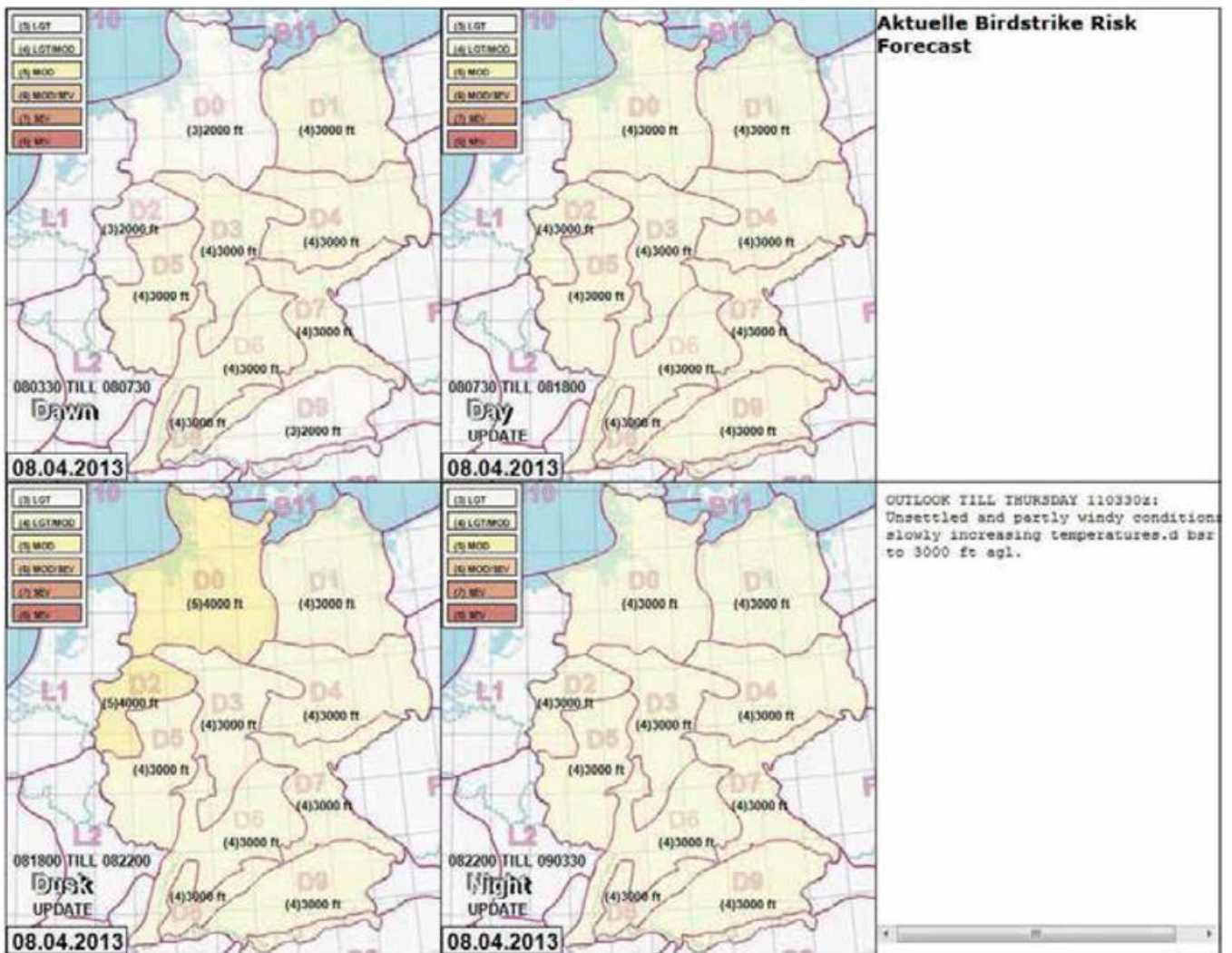


Abb. 11-4: Vogelschlagrisikovorhersage-Präsentation im IntranetBw. Intensitäten und Obergrenzen (über GND) für geophysikalische BeratungsgröÙräume und die Tagesphasen Morgendämmerung, Tag, Abenddämmerung und Nacht.

bei der Weiterverarbeitung der Signale weitestgehend zu unterdrücken. Dies gelingt jedoch häufig nur teilweise und es können aus den verbleibenden Daten mittels Experteninterpretation Vogelzugintensitäten bestimmt werden. Hierzu bedarf es der Berücksichtigung weiterer atmosphärischer Parameter hinsichtlich der Ausbreitungsbedingungen für Radarstrahlen und weiterer meteorologischer Faktoren. Da großräumiger Niederschlag auf Vogelzug ver hindernd wirkt (ERNI et al. 2002), kommt der Kenntnis der vom Wetterradar gemessenen Niederschlagsverteilung eine wichtige Bedeutung zu.

### 3.2 Vogelzugwarnung

Vergleichbar mit Gewitterwarnungen sind Vogelschlagwarnungen-Nowcastings von bis zu vier Stunden Dauer, die auf eine schon erkannte Gefahr aufmerksam machen und unverzüglich an die Bedarfsträger zu vermitteln sind. Als spezielle NOTAM (= *NOTice To AirMen*) bilden die *BIRDTAM (BIRD-warning To AirMen)* bei der Regelung des militärischen Flugbetriebes die Grundlage für Flugbetriebseinschränkungen in den darin angegebenen Zeiten und Räumen. *BIRDTAM* werden über das meteorologische Datennetz und das feste Flugsicherungsdatennetz

(AFTN) verbreitet. Die Erzeugung von systematischen Warnmeldungen und Warnlagen aus Beobachtungsmeldungen ist seit vielen Jahren in dem **CO**mputerunterstützten **BI**ologischen **BE**ratungssystem (COBIBE) als automatisiertes operationelles Verfahren realisiert und im **Deutschen Meteorologischen Rechenzentrum (DMRZ)** - Anteil Bundeswehr - implementiert. Die Meldungskommunikation eingehender als auch ausgehender Meldungen geschieht über die automatische Fernmeldezentrale des ZGeoBw (FMZ aut.). Die wichtigsten Aufgaben dieses Verfahrens sind die verzugslose automatische Verarbeitung, 24/7-Verfügbarkeit, Einarbeitung neuer warnungsrelevanter Informationen in eine eventuell schon existierende *BIRDTAM*-Warnlage unter gegebenenfalls systematischer Glättung der Intensitätsstufen, Warnzeiten und Warnhöhen, damit für den Flugbetrieb realistische und übersichtliche Informationen herausgegeben werden. Innerhalb des militärischen Flugbetriebes der Bundeswehr werden die Informationen zusammen mit dem Flugwetter stets aktualisiert über die Beratungsstellen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr mittels Beratungssystem GGS-Ninjo (siehe Abb. 11-2), innerhalb des fliegenden Verbandes über das Informationsverteilsystem GeoMIA und zusätzlich über das Intranet der Bundeswehr (Intra-netBw)

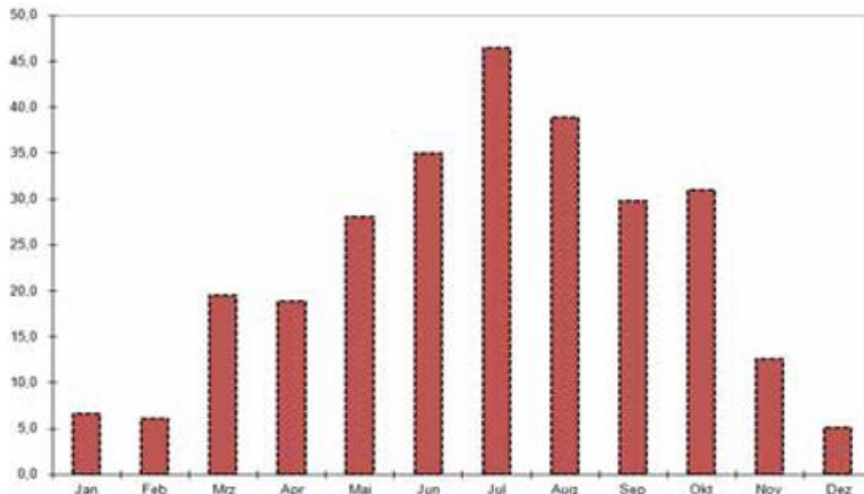


Abb. 11-5: Mittlere monatliche Anzahl gemeldeter Vogelschläge im Flugbetrieb der Bundeswehr für den Zeitraum 2001 – 2011 für Deutschland.

an die Piloten und das Einsatzpersonal verbreitet. Über die NOTAM-Zentrale der Deutschen Flugsicherung (DFS GmbH) werden sie auch der Zivilluftfahrt als Warnhinweise zur Verfügung gestellt.

BIRDTAM werden besonders häufig und großräumig während der Hauptvogelzugzeiten im Frühjahr und Herbst herausgegeben. In Abbildung 11-3 werden aus einem zehnjährigen Zeitraum die Jahrgänge der Zugintensitäten anhand von Warnstundensummen dargestellt. Deutlich treten die Gipfel der Vogelzugphasen von Ende Februar bis Mitte April und von Ende September bis Ende November hervor. Dabei unterliegen die Linien der einzelnen Jahre markanten Verschiebungen innerhalb dies Grundmusters, welche den entsprechenden zugförderlichen Wetterbedingungen zugeordnet werden können.

#### 4 Vogelschlagrisiko-Vorhersage

Aufgrund der schon im Vorhergehenden erwähnten engen Beziehung zwischen Wetterbedingungen und dem Aktivitätsverhalten der Vögel ist diese Abhängigkeit auch die Grundlage zur Vorhersage der Vogelflugaktivität, die maßgeblich das „Vogelschlagrisiko“ bestimmt. Grundsätzlich wird das Vogelschlagrisiko von weiteren Variablen bestimmt, zum Beispiel dem Luftfahrzeugtyp, dessen Form, der Flugeschwindigkeit und der Flughöhe, aber auch der Vogelart und deren Tendenz zur Schwarmbildung (MORGENROTH 2003). Zur Umgehung von Risiken bereits in der Planungsphase und auch wegen der unmittelbaren flugbetriebseinschränkenden Auswirkungen der BIRDTAM-Vogelschlagwarnungen auf den Übungs- und Einsatzbetrieb der Bundeswehr wurde schon frühzeitig der Bedarf nach einer zusätzlichen Vorhersage des Vogelschlagrisikos als Planungsvorhersage deutlich. Daraufhin wurde vom Dezernat Biologie eine 24-stündige Vogelschlagrisikovorhersage (englisch.: *Birdstrike Risk Forecast*) nach einem einfachen Punktwertverfahren mit Entscheidungsbaumprinzip konzipiert und fortan kontinuierlich weiterentwickelt.

In der aktuellen Version besteht das Verfahren aus einer Desktopanwendung mit integrierter Datenbank für Modellparameter und mit numerischer Modelldatenversorgung, die vom diensthabenden Meteorologen (MvD) in der Meteorologischen Vorhersagezentrale ausgeführt und interaktiv bedient wird. Ausgaben werden täglich während der Nacht erstellt und während der Vogelzugphasen im Frühjahr und Herbst vormittags anhand neuerer Wetter- und Vogelzuginformationen aktualisiert. Das Verfahren BiStRiFo (*Birdstrike Risk Forecast*) wird in einem ersten Verarbeitungsschritt mit numerischen Vorhersagedaten versorgt. Diese sind für definierte geophysikalische Beratungsräume und

Zeiträume aus COSMO-EU-Daten abgeleitete vorherrschende Werte für die meteorologischen Parameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Temperaturänderungen, Thermik, Niederschlagsart und -dauer, die als *First Guess* vom MvD auf Plausibilität überprüft und gegebenenfalls verändert werden. Das Verfahren bestimmt aus diesen Daten zunächst aufgrund einer Parameterbewertung das Vogelschlaggrundrisiko in den jahreszeitabhängigen jeweiligen Aufbruch- und Beratungsgebieten und führt anschließend in den Zugzeiten Bilanzierungen hinsichtlich des Vogelzugverlaufs der Vortage durch, da bei vergleichbarer Wetterlage die Vogelzugaktivität nach starkem Beginn kontinuierlich abnimmt. Die im Verfahren verwendeten Entscheidungsbäume sind dabei den saisonalen ornithologischen Verhältnissen angepasst, so dass zum Beispiel im Sommer das Vogelschlagrisiko in hohem Maße auf die Thermikvorhersage reagiert, anstatt auf Windrichtungen wie im Frühjahr und Herbst.

Dem tageszeitlichen Aktivitätsmuster entsprechend wird die 24-stündige Vorhersage für die vier Tagesperioden, Nacht, Morgendämmerung, Tag und Abenddämmerung erstellt. Für über den 24-stündigen Vorhersagezeitraum hinausgehende Folgetage wird eine Einschätzung des Meteorologen auf Grund der Wetterentwicklung textuell als Outlook erstellt. Die *Birdstrike Risk Forecast* wird über die FMZ aut. als Meldungstext und als Grafik im IntranetBw (Abb. 11-4) verbreitet und ist fester Bestandteil des Wetterbriefings sowie der Flugwetterberatung. Im Gegensatz zu BIRDTAM-Warnungen führen sie jedoch nicht unmittelbar zu vorgeschriebenen Flugbetriebseinschränkungen, sondern gelten als Warnhinweise.

#### 5 Verifikation und Nachanalyse

Bei den operationellen Produkten BIRDTAM und *Birdstrike Risk Forecast* sind direkte Erfolgskontrollen hinsichtlich verhinderter Vogelschläge nicht möglich, da der Gegenbeweis nicht erbracht werden kann. Indirekt werden jedoch anhand der jährlich im Dezernat erstellten Vogel-

schlagstatistiken Vergleiche angestellt, zum Beispiel, zwischen der Anzahl der monatlichen BIRDTAM-Warnungen und den registrierten Vogelschlägen. Der deutlich negative Trend der Anfangsjahre und dass in den vergangenen Jahren insgesamt sowie während der Hauptvogelzugphasen im Frühjahr und Herbst keine Erhöhung der Vogelschläge erkennbar ist (Abb. 11-5), wird als Indiz für die Wirksamkeit der Verfahren und Maßnahmen gewertet. Das sommerliche Maximum in Abbildung 11-5 erklärt sich in erster Linie durch die nicht per Radar erfassbaren lokalen Vogelflugaktivitäten, insbesondere der flugbetriebsunfähigen Jungvögel und der saisonalen Individuenzunahme. Vogelschlagrisikovorhersagen werden im täglichen Routinebetrieb mit den Radarvogelzugdaten und weiteren ornithologischen Beobachtungsdaten abgeglichen. Die im Verfahren BiStRiFo integrierte Modellparameter-Datenbank ermöglicht schnelle Anpassungen und Nachjustierungen der Modellparameter zur Verbesserung der Vorhersage. Systematische Abgleiche von Modellausgaben mit Radar-Vogelzugdaten und Wetterlagen ermöglicht ein in jüngster Zeit im Dezernat entwickelter Viewer, mit dessen Hilfe längere Zeiträume in einer Zusammenschau von Archivdaten systematisch nachanalysiert und statistisch ausgewertet werden können. Dabei werden auch die vom DWD aus numerischen Daten erzeugten objektiven Wetterlagenklassifikationen für die Charakterisierung der Wetterlage einbezogen.

## 6 Aktuelle Entwicklungen und Ausblick

Aufgrund der Forderung des Vogelschlagerrlasses sind die Verfahren zur Vogelschlagverhütung unter Berücksichtigung neuer wissenschaftlicher und technologischer Erkenntnisse fortzuentwickeln. Zur Zeit wird als eine wichtige Komponente des Gesamtsystems das computerunterstützte biologische Beratungsverfahren (COBIBE) zur automatischen Generierung von Vogelschlagwarnungen aus Beobachtungsinformationen dahingehend weiterentwickelt, dass es unter anderem auch über die Grenzen Mitteleuropas hinaus eingesetzt werden kann. Der Prototyp wird derzeit im operationellen Parallelbetrieb erprobt.

Auf dem Gebiet der sensorgestützten Vogelzugerfassung wird mit der Inbetriebnahme weiterer neuer Flugplatzradargeräte die Feinjustierung des Vogelzugererkennungskanals fortgesetzt. Die Möglichkeiten der Vogelzugerken-

nung mittels moderner Sensoren werden weiterverfolgt und auf deren Eignung für den operationellen Einsatz getestet.

Mittels Archivdaten werden die systematischen Nachanalysen weiter vorangetrieben und sukzessive in Modellverbesserungen umgesetzt.

## Literatur

- BAUER, H.-G., BEZZEL, E., FIEDLER, W., 2005: Das Kompendium der Vögel Mitteleuropas - Alles über Biologie, Gefährdung und Schutz. *AULA-Verlag*, 2. Auflage, 3 Bände.
- BERTHOLD, P., 2008: Vogelzug – Eine aktuelle Gesamtübersicht. *Wissenschaftliche Buchgesellschaft*, 6. Auflage, 280 Seiten.
- DOCTER, A.M., LIECHTI, F., HOLEMAN, I., 2009: Bird detection by operational weather radar. KNMI, Scientific Report, WR 2009-06, De Bilt, 203 pp.
- ELPHICK, J. (Hrsg.), 2008: Atlas des Vogelzugs – Die Wanderung der Vögel auf unserer Erde. *HAUPT Verlag*, 176 Seiten.
- ENGELBART, D., GÖRSDORF, U., RUHE, W., 1998: Effects and observation of migrating birds on a boundary-layer windprofiler in Eastern Germany., *Meteorol. Zeitschrift* 7, 280-287.
- ERNI, B., LIECHTI, F., UNDERHILL, L. G., BRUDERER, B., 2002: Wind and rain govern the intensity of nocturnal bird migration in Central Europe – A log-linear regression analysis. *ARDEA* 90 (1), 155–166.
- GATTER, W., 2000: Vogelzug und Vogelbestände in Mitteleuropa - 30 Jahre Beobachtung des Tagzugs am Randecker Maar. *AULA-Verlag*, 656 Seiten.
- MORGENROTH, C., 2003: Entwicklung eines Indexes zur Berechnung der Flugsicherheitsrelevanz von Vogelarten. *Vogel und Luftverkehr*, Heft 2003/2, 64–78.
- RUHE, W., 2008: Regionale Vogelzugüberwachung mit dem zukünftigen Flugplatzradar ASR-S. *GeoInfoForum – Mitteilungen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr*, Ausgabe 2008, 5-6.
- RUHE, W., 2008: Erprobung neuer Methoden zum Monitoring der Vogelflugaktivität am Flugplatz Schleswig-Jagel. *GeoInfoForum – Mitteilungen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr*, Ausgabe 2008, 11-13.
- VERSCHIEDENE AUTOREN, 2010: Berichte des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr - 16. Tagung der Vogelschlagbeauftragten auf Bundeswehrflugplätzen, Heft 26/2010, 61 Seiten.

T. PRENOSIL, B. STOCKHAUSEN

# 12 Konzept zur meteorologischen Einsatzunterstützung für die Aufklärungsdrohne „Heron 1“

Concept for a meteorological mission support of unmanned aerial reconnaissance vehicle „Heron 1“

## Zusammenfassung

Im Rahmen von friedenssichernden Auslandseinsätzen der Bundeswehr gewinnt die Nutzung unbemannter Drohnen zur Aufklärung zunehmend an Bedeutung. Statt rein manueller Beratungsverfahren besteht für Drohnen mit großen Reichweiten und Flugzeiten bis zu 24 Stunden vermehrt Bedarf an automatisierten Prognosen auf der Basis hoch aufgelöster numerischer Modelle. Der Artikel skizziert ein entsprechendes Verfahren der Bundeswehr für den Drohrentyp „Heron 1“.

## Summary

For out of area peacekeeping missions of the German Bundeswehr the usage of unmanned aerial vehicles (UAVs) for tactical reconnaissance gets more and more importance. Instead of purely manual methods UAVs with large operating distances and operating times up to 24 h generate an increasing demand for automated forecasts based on high resolution numerical models. The article outlines an appropriate method of the German Bundeswehr for UAVs of type „Heron 1“.

## 1 Einleitung

„Heron 1“ ist ein unbemanntes Aufklärungssystem der Bundeswehr (Abb. 4-1) mit einem 86 kW-Schubpropeller-Motor, einer Länge von 8,5 m und einer Spannweite von 16,6 m (WIKIPEDIA 2013), das von der israelischen Firma IAI produziert wird. Die zulässige Fluggeschwindigkeit als „Indicated Airspeed“ (IAS) der Drohne liegt zwischen minimal 50 kn und maximal 120 kn bei einer Flughöhe zwischen 300 m über Grund und 9000 m über Meeresniveau (MSL). Die typische Reisegeschwindigkeit beträgt 60 bis 80 kn und die Reiseflughöhe 3000 m bis 6000 m MSL. Die



Abb. 12-1: Aufklärungsdrohne „Heron 1“ (Quelle: Bundeswehr).

maximale Flugzeit ist je nach Nutzlast 17 bis 25 Stunden mit Einsatzreichweiten von 200 km (ohne Satellitenkommunikation). Mit Satellitenkommunikation vergrößert sich der Aktionsradius.

„Heron 1“ dient der Echtzeitüberwachung und Zielortung. An Bord befinden sich zwei TV-Kameras, eine Infrarot- und eine Radar-Einheit, ein Kommunikationssystem und ein Autopilot. Das Luftfahrzeug besitzt auch Sensoren zur Steuerung von Temperatur-, Wind- und Eiswarnsystemen. Bei Überschreitung vorgegebener Grenzwerte muss der Einsatz verändert oder abgebrochen werden. Daher ist es erforderlich, für jede Mission eine flugmeteorologische Vorhersage zu erstellen. Hierfür ist ein geeigneter „Man-Machine-Mix“ bestehend aus Berater, Einsetzer und Pilot (*Man*) und dem Vorhersagemodell in Form von „Go/NoGo“-Ampelvorhersagen (*Machine*) geplant. Ziel der Verfahrensentwicklung im Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr (AGeoBw) ist es, einerseits die Systemeffektivität zu gewährleisten und andererseits Ausfälle und Abbrüche zu minimieren. Die Grundlagen für das Verfahren wurden im Rahmen einer Diplomarbeit an der Fachhochschule des Bundes für öffentliche Verwaltung, Fachbereich Wetterdienst (GRUHLER 2010), und einem Praktikum zum Bachelorstudiengang der Meteorologie (STOCKHAUSEN 2011) gelegt.

## 2 Beratungsverfahren und erste Ergebnisse

Baulich, aerodynamisch und einsatzbedingt leiten sich aus folgenden meteorologischen Faktoren konkrete Grenzwerte für den Einsatz von „Heron 1“ ab:

- Minimale und maximale Temperatur,
- maximaler Wind im Flug mit Böen,
- bei Start und Landung maximaler Mittelwind und Böen (Head/Cross/Tail-Komponenten) mit spezieller Betrachtung einer nassen Runway,
- Mindestsicht bei Landung mit Wolkenuntergrenze und maximaler Niederschlagsintensität,
- maximaler Bedeckungsgrad im Flug,
- keine Vereisung,
- kein Niederschlag im Einsatzgebiet und
- Mindestabstand zu Gewittern wegen der Bordelektronik.

Die entsprechenden (nur für den Dienstgebrauch eingestuft) Richtwerte dienen der Entwicklung einer einfachen Ampelvorhersage für den Einsatz von „Heron 1“, die als Perfect-Prog-Methode unmittelbar auf numerischen Vorhersagen basiert. Das Verfahren soll eine aufwändige manuelle Auswertung der Modellergebnisse ersetzen und als Guideline für die Beratung dienen. Die Sichtangaben, die sowohl für die Flugführung als auch für die Aufklärungskameras relevant sind, werden dabei im ersten Schritt empirisch den vorhergesagten Wetterelementen zugeordnet. In Zukunft wird auf das sogenannte TAF-Guidance-Verfahren des AGeoBw zurückgegriffen, das über einen Ansatz mittels **Model Output Statistics (MOS)** weltweit Sicht- und **Ceiling-Vorhersagen (CEIL)** für einzelne Stationsorte liefert. Grenzwertverletzungen führen bei der Flugplanung zur vollständigen oder höhenabhängigen Sperrung von Einsatzräumen und Flugstrecken sowie Landeplätzen.

Das Tailwind-Kriterium spielt im operationellen Einsatz keine Rolle. Bei einer geraden, in beide Richtungen nutzbaren Runway kann die Drohne immer so starten und landen, dass kein Rückenwind auftritt. Theoretisch sind dazu aus der genauen Orientierung jeder Startbahn die relativen Windkomponenten zu bestimmen. Praktisch wird für alle Himmelsrichtungen im 45 Grad Abstand aus den Windvektoren der Head-, Cross- und Tail-Wind berechnet.

Das Beratungsverfahren für „Heron 1“ basiert auf den Modellen COSMO-EU (LME mit etwa 7 km Maschenweite, SCHULZ und SCHÄTTLER 2010), COSMO-DE (LMK mit etwa 3 km, BALDAUF et al. 2011) sowie deren verschiebbaren Versionen RLM und RLMK (**Relocatable LM** und **LMK**), die im Bundeswehranteil des Deutschen Meteorologischen Rechenzentrums beim DWD für die Einsatzgebiete der Bundeswehr gerechnet werden. Als fiktive Testgebiete wurden von STOCKHAUSEN (2011) die Räume Afghanistan und Libyen

benutzt. Das Verfahren benötigt in der derzeitigen Version Temperatur, Horizontalwind, Vertikalwind, spezifische Feuchte, Bedeckung, Wolkenwassergehalt, Niederschlag, Wetterelemente, turbulente kinetische Energie (für Böenabschätzung) und Orographiehöhe.

Das COSMO-System liefert bisher keine expliziten Vorhersagen für Böen. Deshalb werden in einem ersten Schritt die bodennahen Böen aus der Differenz der verfügbaren Maximal- und Mittelwinde in 10 m über Grund (SCHULZ und SCHÄTTLER 2010) abgeschätzt. Diese Werte werden anschließend linear in der turbulenten kinetischen Energie vertikal extrapoliert. Dieser Ansatz stellt physikalisch sicherlich die schwächste Komponente des Verfahrens dar.

Damit stehen alle bisher eingeplanten Informationen für die Ampelvorhersage im Sinne einer „Go/NoGo“-Guidance zur Verfügung. Die Ergebnisse werden mit Hilfe eines Geoinformationssystems (GIS) visualisiert. Die Informationen werden auf separaten Grafikebenen (Layer) bis 24 Stunden Vorhersagezeit (einstündig) getrennt für die Flug- und die Landephase dargestellt. In den flächendeckenden Prognosen für die Flugphase (siehe Abb. 4-2) sind zur besseren Übersicht lediglich die Grafikebenen mit dem Niederschlag und den Wetterelementen opak eingefärbt, während die Ebenen für die Flugniveaus hohe Transparenz aufweisen. Die „NoGo“-Kriterien in transparentem Rot überlagern sich nach dem Motto: Je intensiver das Rot ausfällt, desto mehr Grenzwertüberschreitungen sprechen für „NoGo“. Hierdurch lassen sich Gebiete mit kompletten „NoGo“-Bedingungen besser von Bereichen unterscheiden, in denen nur ein oder zwei Niveaus nicht befliegen werden können. Die Grafikebene für die Landung soll alternativ als einzelne Punktprognose oder flächenhaft in Form von farbkodierten Stationseintragungen (siehe Abb. 4-3) angeboten werden.

Die Beispiele beschränken sich auf die Kriterien für Wetterelemente, Niederschlag und Wind. Diese Parameter sind

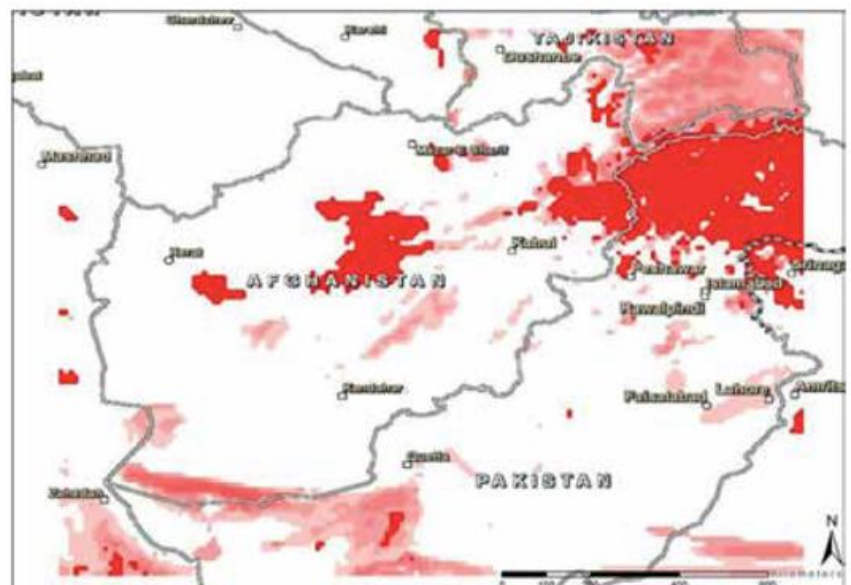


Abb. 12-2: Fiktive Einsatzprognose für den Raum Afghanistan (aus STOCKHAUSEN 2011).

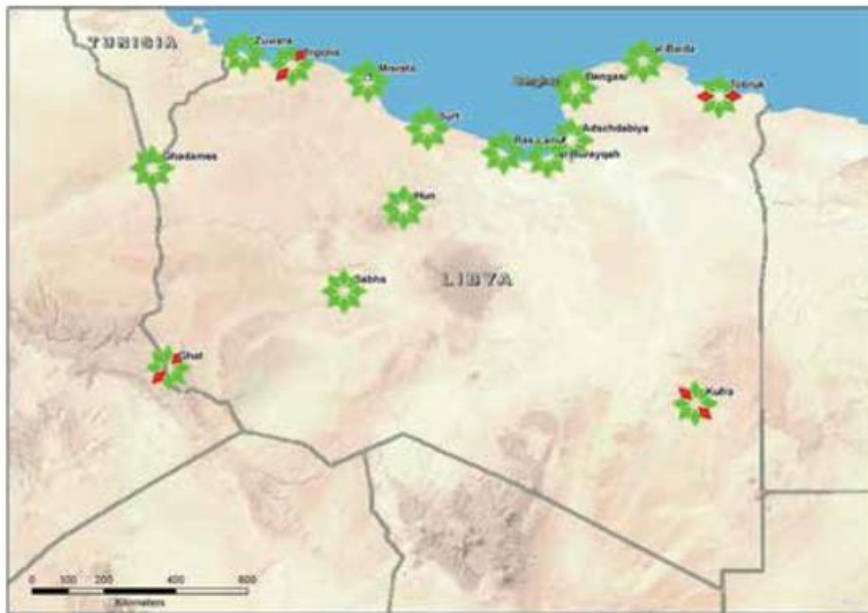


Abb. 12-3: Fiktive Landeprognosen für den Raum Nordafrika (aus STOCKHAUSEN 2011).

später im operationellen Betrieb am einfachsten aus den Modellvorhersagen nachvollziehbar. Die Grafikebenen für die Flugphase enthalten dagegen sehr viele unterschiedliche Parameter, sodass hier eine Überprüfung der akkumulierten Kriterien anhand der Numerik im Einzelfall schwierig ist und nur das Gesamtergebnis interpretiert werden kann.

Abb. 4-2 zeigt exemplarisch eine fiktive Einsatzprognose für die Flugphase des „Heron I“ im Raum Afghanistan während des Frühjahrs 2011 auf der Basis des RLM-Modelles. Die Einschränkungen für Flugniveaus bis 4 000 m über Grund (bezogen auf die Modelltopographie des RLM) sind mit transparenten Rotabstufungen markiert, wobei die einzelnen Grenzwertkriterien unterschiedlich akkumulieren. Die Ausschlussgebiete wegen des Niederschlags sind in opakem Rot dargestellt, womit das Einsatzkriterium dort auf „NoGo“ steht. Die abgestuften Rotfärbungen lassen noch Einsätze in bestimmten Flugniveaus zu. Die skalierte Variabilität der RLM-Prognosen im etwa 7 km Raster garantiert eine differenzierte Beratungspraxis speziell unter Berücksichtigung orographischer Einflüsse. Abb. 4-3 springt zeitgleich zur Darstellung einer fiktiven Landeprognose (meteorologische Grenzwerte für die Landephase) in den Raum Nordafrika. Die aufgrund des Windes gesperrten Landebahnausrichtungen erscheinen in Rot. Das trifft in dem gezeigten Fall nur auf wenige der ausgewählten Orte zu, wie Tripolis und Ghat von Südwest nach Nordost, Tobruk von West nach Ost und Kufra von Nordwest nach Südost. Alle anderen Windsektoren (im 45 Grad Abstand) sind gemäß den Modellvorhersagen unkritisch und stehen auf Grün. Beide Produkte sind als Guideline zu verstehen, die von geschultem Fachpersonal in konkrete Beratungen umzusetzen sind. Dazu sollen alle Layer-Informationen und zusätzlich Punktprognosen für einzelne Landeplätze, die sich durch Anklicken der Windrosen in Abb. 4-3 öffnen lassen, interaktiv zur Verfügung gestellt werden. Die Windkriterien für „Heron I“ machen dabei insgesamt eine separate Betrachtung von Sandstürmen überflüssig.

Es wird an dieser Stelle noch einmal klargestellt, dass die ausgewählten Vorhersagefenster nicht die tatsächlichen Einsatzgebiete für die „Heron I“-Aufklärungsdrohnen der Bundeswehr wiedergeben. Dazu sind strenge politische und militärische Mandate erforderlich, worum sich die Verfahrensentwicklung für die Flugwetterberatung aber nicht zu kümmern braucht und die an dieser Stelle auch nicht bekannt sind. Natürlich könnten für Afghanistan neben den Flugprognosen auch die entsprechenden Landevorhersagen gezeigt werden und vice versa für Nordafrika. Da aber Hinweise auf die Gesamteinsatzfähigkeit des Systems in dem Artikel nicht gegeben werden sollen, wird darauf bewusst verzichtet.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem dargestellten Verfahren verfügt die Bundeswehr über ein weltweit einsetzbares Beratungsinstrument für die Aufklärungsdrohne „Heron I“. Inhaltliche Verbesserungen im Hinblick auf vertikal differenzierte Böenvorhersagen und die Sicht- und Ceiling-Prognosen sind in Bearbeitung. Das Verfahren wird Ende 2013 in den operationellen Betrieb gehen.

### Literatur

BALDAUF, M., FÖRSTNER, J., KLINK, S., REINHARDT, T., SCHRAFF, C., SEIFERT, A., STEPHAN, K., 2011: Kurze Beschreibung des Lokal-Modells Europa COSMO-DE (LMK) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD. Lead Centre for Nonhydrostatic Modelling, DWD, Geschäftsbereich FE.

GRUHLER, T., 2010: Entwicklung eines Beratungsverfahrens für das UAS-Waffensystem HERON und Test des Verfahrens im Rahmen von zwei Fallstudien im Einsatzgebiet der Bundeswehr in Afghanistan. Diplomarbeit. Fachhochschule des Bundes für öffentliche Verwaltung, Fachbereich Wetterdienst.

SCHULZ, J.-P., SCHÄTTLER, U., 2010: Kurze Beschreibung des Lokalmodells Europa COSMO-EU (LME) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD. Lead Centre for Nonhydrostatic Modelling, DWD (FE 13).

STOCKHAUSEN, B., 2011: Wetterberatung für das Waffensystem Heron I. Bericht zum Praktikum Meteorologische Forschung (met555) der Universität Bonn, Bachelor-Studiengang. Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr, Teile Traben-Trarbach.

WIKIPEDIA, 2013: IAI Heron, [http://de.wikipedia.org/wiki/Heron\\_1](http://de.wikipedia.org/wiki/Heron_1), letzter Aufruf 5.4.2013.

F. HOLZÄPFEL

# 13 Flugzeug-Wirbelschleppen – von der Grundlagenforschung zur Anwendung

Aircraft wake vortices - from fundamental research to operational application

## Zusammenfassung

Die unterschiedlichen Aspekte des Themas Wirbelschleppen erschließen sich im Spannungsfeld vielfältiger fluiddynamischer Phänomene und den Herausforderungen, die Wirbelschleppen für die nachhaltige Entwicklung der Sicherheit und Kapazität der zivilen Luftfahrt darstellen. Das vorliegende Manuskript gibt eine Übersicht über verschiedene Aspekte des Themas, beginnend bei den historischen Wurzeln der Erforschung der Wirbelschleppen, über die Darstellung ihrer Eigenschaften, wie sie sich aus Messung und Modellierung erschließen, bis zur Einführung von Wirbelschleppen Simulationssystemen zur Vorhersage dynamischer Flugzeugstaffelungen in verschiedenen Flugphasen sowie zur Sensitivitätsanalyse und letztlich dem Sicherheitsnachweis.

## Summary

Aircraft trailing vortices constitute both a kaleidoscope of instructive fluid dynamics phenomena and a challenge for the sustained development of the safety and capacity of the air-transportation system. An overview of the wake vortex issue is given commencing at its historical roots, proceeding with a sketch of the nature and characteristics of wake vortices resulting from field measurement and numerical simulation, and concluding with a depiction of the design and performance of wake vortex simulation systems established for the prediction of dynamic aircraft separations in different flight phases and for sensitivity and risk analysis.

## 1 Das Phänomen Wirbelschleppen

Als unvermeidbare Folge des Auftriebs erzeugen Flugzeuge ein Paar gegensinnig rotierender und langlebiger Nachlaufwirbel - die sogenannte Wirbelschleppen. Bereits vor über einem Jahrhundert stießen LANCHESTER (1907) und PRANDTL (1918) bei ihrer Suche nach einer Theorie des Fliegens auf die Wirbelschleppen. Die Prandtl'sche Traglinientheorie besagt, dass die Stärke des gebundenen Wirbels<sup>1</sup>, ausgedrückt durch seine Zirkulation, von der Wurzel zur Spitze des Flügels hin abnimmt (siehe Abbildung 13-1). Deshalb löst sich kontinuierlich Vorticity vom Tragflügel ab und bildet eine Wirbelschicht. Diese rollt sich durch Selbstinduktion an ihren Enden auf und formiert sich zu den Nachlaufwirbeln. Die Traglinientheorie beschreibt auch bereits die Entstehung des induzierten Widerstands, der bei Flügeln unendlicher Spannweite verschwände. Bei Flügeln endlicher Spannweite entsteht der induzierte Widerstand durch einen Abwind vor der Tragfläche, der durch die Nachlaufwirbel induziert wird und damit den effektiven Anstellwinkel des Flugzeuges reduziert. Die durch den induzierten Widerstand geleistete Arbeit entspricht in etwa der kinetischen Energie der Wir-

belschleppen und kann in Analogie zum Wellenwiderstand eines Schiffes verstanden werden.

Andere Erklärungen der Wirbelschleppen-Entstehung bemühen

- die Druckdifferenz zwischen Saug- und Druckseite des Flügels, die eine Umströmung der Flügelspitzen auslöst und dadurch die Bildung eines Wirbelpaars initiiert.
- Die Tragflächen lenken die Anströmung in einen näherungsweise uniformen Abwind um. An dessen Rändern entstehen Scherschichten, die sich zu den Nachlaufwirbeln aufrollen.
- Schließlich besagt der erste Helmholtz'sche Wirbelsatz, dass ein Wirbelfaden nicht in einem Fluid enden kann. Er ist entweder geschlossen oder endet an einer Begrenzung des Fluids. Bei Wirbelschleppen besteht der geschlossene Wirbelfaden aus dem gebundenen Wirbel am Tragflügel, wird durch die Nachlaufwirbel fortgesetzt und durch den Anlaufwirbel geschlossen.

Die Stärke der Wirbelschleppen wird durch ihre Zirkulation,  $\Gamma$ , charakterisiert. Die Zirkulation ist ein integrales Maß für

<sup>1</sup> Der gebundene Wirbel ist ein hypothetisches Wirbelfilament entlang einer Traglinie und repräsentiert einen geraden Flügel. Gemäß dem Satz von Kutta-Zhukhovski erfährt der gebundene Wirbel in einer gleichförmigen Anströmung eine Auftriebskraft.

die Vorticity (Wirbelstärke) innerhalb des Wirbels. Im stationären Horizontalflug beträgt die anfängliche Zirkulation in etwa

$$\Gamma = \frac{W}{(\pi/4)\rho BV} \tag{1}$$

Somit ist die Stärke der Wirbel proportional zum Gewicht des Flugzeugs  $W$  und umgekehrt proportional zur Dichte der Luft  $\rho$ , der Spannweite  $B$  und der Fluggeschwindigkeit  $V$ . Die Zirkulationswerte im Reiseflug und im Landeanflug unterscheiden sich nur wenig, da die inverse Variation von Luftdichte und Fluggeschwindigkeit sich in etwa kompensieren.

Abbildung 13-2 verdeutlicht, dass die beiden Wirbel sich gegenseitig eine Sinkgeschwindigkeit

$$w = \frac{\Gamma}{2\pi b} \tag{2}$$

induzieren, wobei  $b = \pi/4 B$  den Wirbelabstand bezeichnet. Die anfängliche Sinkgeschwindigkeit der Nachlaufwirbel kommerzieller Flugzeuge variiert zwischen 1 und 2 m/s. Unter optimalen Bedingungen (neutrale thermische Schichtung, kaum Turbulenz) können die Wirbel bis über 600 m tief absinken (MISAKA et al. 2012). Beim Absinken wird das Fluid innerhalb einer ovalen Stromlinie mitgenommen, die die Staupunkte oberhalb und unterhalb des Wirbelpaars verbindet (siehe Abbildung 13-2). Die Strömung außerhalb des Ovals entspricht der reibungsfreien Umströmung eines Festkörpers gleicher Form. Diese quasi reibungsfreie Strömungstopologie erklärt den geringen Widerstand des absinkenden Ovals und die großen Distanzen, die dieses in einer ungestörten Umgebung zurücklegen kann.

Bei entsprechenden meteorologischen Umgebungsbedingungen können Wirbelschleppen mehrere Minuten überdauern und sind daher eine potentielle Gefahr für nachfolgende Flugzeuge. Mit der Einführung der Boeing 747 in den siebziger Jahren traten erstmals größere Probleme mit Wirbelschleppen auf. Um Wirbelschleppen Begegnungen zu vermeiden, etablierten die *Federal Aviation Administration* (FAA) und die *International Civil Aviation Organization* (ICAO) Mindestabstände zwischen aufeinander

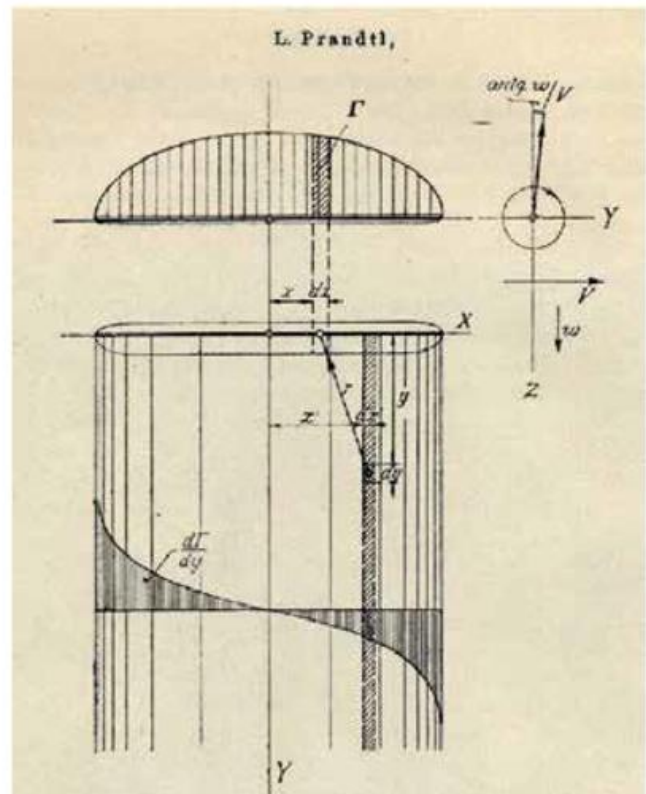


Abb. 13-1: Skizze von Ludwig Prandtl zur Illustration der elliptischen Zirkulationsverteilung entlang der Traglinie (oben) und Ablösung differentieller Wirbelfilamente (unten) (reproduziert aus PRANDTL 1918).

folgenden Flugzeugen verschiedener Gewichtsklassen, die zwischenzeitlich um die Klasse SUPER für die A380 erweitert wurden (siehe Tabelle 13-1).

Mittlerweile hat die ICAO einen Prozess zur Harmonisierung der Wirbelschleppen Separationen eingeleitet (RECAT). Zunächst sollen die vier Gewichtsklassen auf sechs Flugzeugklassen erweitert werden. Die FAA hat bereits neue Kategorien vorgestellt, die seit dem 2. November 2012 am Flughafen Memphis eingesetzt werden (SAFO 12007, 2012). Diese berücksichtigen neben dem Gewicht auch die Anfluggeschwindigkeit, die Flügelcharakteristik und teilweise auch die Wirkung des Rollmomentes auf nachfolgende Flugzeuge. In Europa hat man sich entschlossen, eigene Kategorien zu entwickeln, die aber aktuell noch diskutiert werden. Das langfristige Ziel der ICAO sieht dynamische paarweise Separationen vor, die die beteiligten Flugzeugtypen und die atmosphärischen Umgebungsbedingungen berücksichtigen (vergleiche Kapitel 4.1).

Die aktuell gültigen Mindestabstände können in Spitzenzeiten an großen Flughäfen zu erheblichen Verspätungen führen. Ein Wirbelschleppenwarnsystem, das Flugzeugseparationen bei günstigen Wetterbedingungen anpasst, ohne dadurch das Sicherheitsniveau einzuschränken, könnte erheblich zur Verringerung von Verspätungen beitragen. Im Reiseflug hat die Reduktion der vertikalen Separationen auf 1000 ft im *Reduced Vertical Separation*

führendes Flugzeug	folgendes Flugzeug	minimale Separation
SUPER (A380)	HEAVY	6 NM
SUPER	MEDIUM	7 NM
SUPER	LIGHT	8 NM
HEAVY	HEAVY (>136t)	4 NM
HEAVY	MEDIUM (>7t und 136t)	5 NM
HEAVY	LIGHT (<7t)	6 NM
MEDIUM	LIGHT	5 NM

Tabelle 13-1: ICAO-Mindeststaffelungsabstände für Wirbelschleppen. Für alle nicht genannten Gewichtsklassenkombinationen gilt die Radarstaffelung von 3 NM oder 2,5 NM.

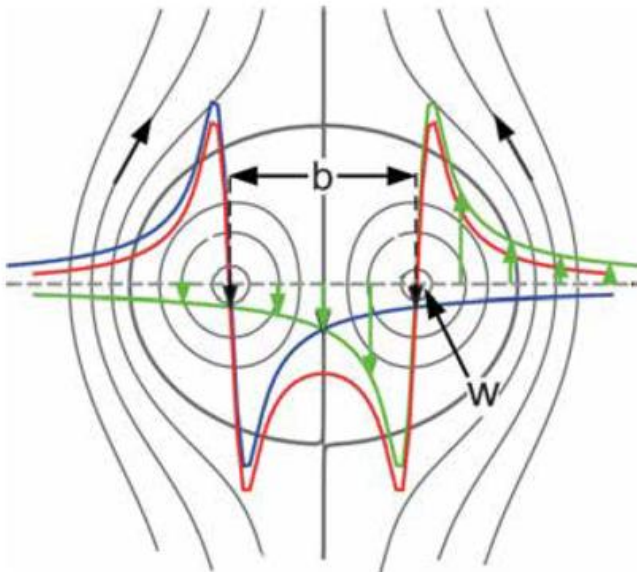


Abb. 13-2: Vertikale Geschwindigkeitsprofile der beiden gegensinnig rotierenden Wirbel (grün und blau) und resultierende Einhüllende der Vertikalgeschwindigkeiten (rot) vor grauen Stromlinien.

Minimum-Luftraum (RVSM) zu einer deutlichen – wenn gleich nur schwer quantifizierbaren – Erhöhung der Zahl der Wirbelbegegnungen geführt. Die durch das *Single European Sky ATM Research Programme* (SESAR) und das *Next Generation Air Transportation System* (NextGen) angestrebte Liberalisierung des Luftraums könnte zu einer weiteren Erhöhung der Wirbeleinflüge in der oberen Atmosphäre führen. Auch die zunehmende Diversifizierung von Flugzeugtypen von Very Light Jets bis zum Megaliner A380 mit zwei durchgängigen Passagierdecks oder der B 747-8 haben umfangreiche Untersuchungen ausgelöst. Offenbar besteht also ein Bedarf an Systemen zur Vermeidung von Wirbelschleppenbegegnungen; am besten nahtlos vom Start bis zur Landung.

Die Entwicklung von Wirbelschleppenwarnsystemen ist eine interdisziplinäre Aufgabe und muss in enger Kooperation der Fachrichtungen Fluidodynamik, Meteorologie, Aerodynamik und Flugführung erfolgen. Die Akzeptanz und Einführung derartiger Systeme bedarf jedoch der Einbindung einer viel größeren Gemeinschaft aus Flugzeugherstellern, Luftverkehrskontrolle, Flughäfen, Fluglinien, Luftfahrtbehörden und nicht zuletzt Piloten.

Die hier vorgestellten Forschungsarbeiten wurden in den Projekten Wirbelschleppe (1999-2007) und Wetter & Fliegen (2008-2012) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt und profitierten von zahlreichen EU-Projekten wie ATC-Wake, AWIA-TOR, CREDOS, C-Wake, FAR-Wake, FLYSAFE, I-Wake, S-Wake, WakeNet, WakeNet2-Europe und WakeNet3-Europe.

Aus den verschiedenen Übersichtsartikeln zum Thema Wirbelschleppe werden hier einige neuere Arbeiten exemplarisch herausgegriffen (HALLOCK et al. 1998, SPAL-

ART 1998, ROSSOW 1999, GERZ et al. 2002, BREITSAMTER 2011).

## 2 Der Physik der Wirbelschleppe auf der Spur

Ein primäres Ziel der Wirbelschleppenforschung ist die Zerfallsmechanismen der Wirbelschleppe zu entschlüsseln, zu modellieren, vorherzusagen oder gar zu beschleunigen. Die große Lebensdauer der Wirbelschleppe jedoch beschränkt Untersuchungen im Windkanal auf relativ junge Wirbel und erschwert Experimente in Einrichtungen wie dem Katapult und Wasserschleppkanal. Direkten Zugang zum realen Wirbelverhalten bietet das *Light detection and ranging Instrument* (Lidar), das Wirbelschleppen realer Flugzeuge vermisst. Doch leider können am Flughafen die meteorologischen Umgebungsbedingungen, die einen maßgeblichen Einfluss auf das Wirbelverhalten haben, weder kontrolliert noch reproduziert werden. Da bei Lidar Messungen die maximale gemessene Geschwindigkeit entlang des Laserstrahls der Wirbelschleppe zugeordnet wird, ist die Interpretation komplexer Geschwindigkeitsfelder in bereits erodierten Wirbeln nur schwer möglich.

Komplementär empfiehlt sich die hochauflösende numerische Simulation, um ein detailliertes Verständnis des Wirbelzerfalls zu erwerben. Der große Vorteil ist, dass alle interessierenden Parameter für die Analyse unmittelbar zur Verfügung stehen. Doch gibt es natürlich auch hier Einschränkungen. Einerseits sollten die numerischen Simulationen in großen Rechengebieten durchgeführt werden, um die Interaktion der Wirbelschleppe mit großen turbulenten Wirbeln der Atmosphäre zu berücksichtigen. Andererseits sollte die Wechselwirkung von Turbulenz und Rotation im kompakten Wirbelkern gut aufgelöst werden. Während direkte numerische Simulationen (DNS) nur kleine Reynoldszahlen erreichen, beeinflusst das Schließungsmodell der Grobstruktursimulation (LES) die Entwicklung des Wirbelkerns. Beide Ansätze schaffen es nicht, die komplexe Interaktion von Turbulenz und Rotation bei großen Reynoldszahlen, mit den Einflüssen komplexer Flugzeuggeometrien und realistischer Umgebungsbedingungen zu vereinen. Trotz der enormen Entwicklung der Rechenleistung und eleganter numerischer Methoden werden Simulationen auch in der Zukunft auf Grenzen stoßen. Experimentelle Untersuchungen realer Wirbelschleppen werden daher auch weiterhin notwendig sein, um die Gültigkeit der Erkenntnisse numerischer Simulationen zu untermauern.

### 2.1 Lidar-Messungen

Bereits 1983 wurden erste Lidar Messungen von Wirbelschleppen am Flughafen Frankfurt durchgeführt. Damals wurde ein 10,6  $\mu\text{m}$ -Continuous-Wave-Doppler-Lidar eingesetzt, das ursprünglich für Wind- und Turbulenzmessungen in der atmosphärischen Grenzschicht entwickelt worden war. Die Ergebnisse dieser Messungen flossen in

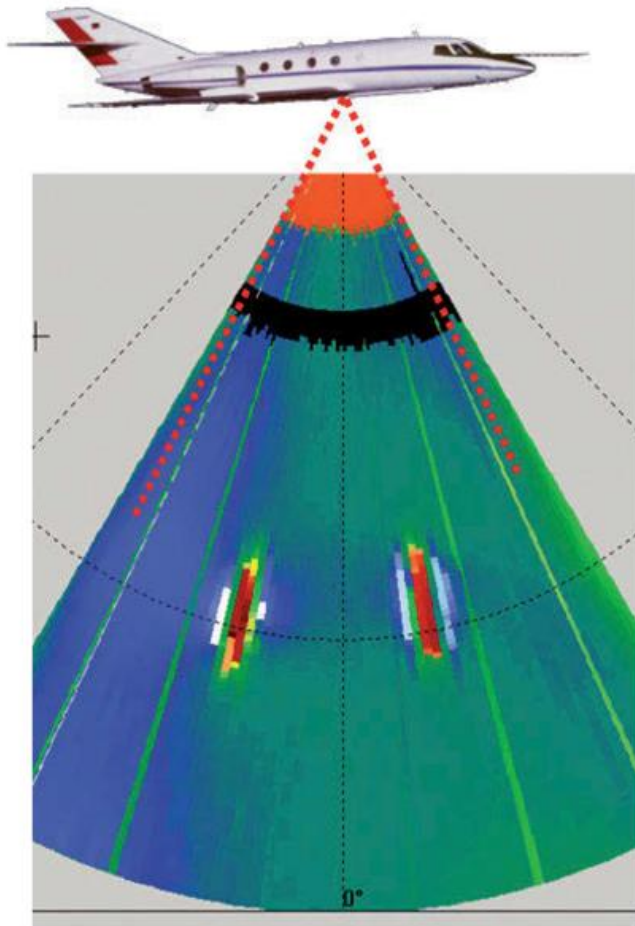


Abb. 13-3: Gleichzeitige Messung der Wirbelschleppen der A380 (rechts) und der A340 (links) mit Lidar an Bord des Forschungsflugzeugs Falcon.

die Entwicklung des Wirbelschleppenwarnsystems der Deutschen Flugsicherung für den Flughafen Frankfurt ein (GURKE und LAFFERTON 1997), welches aber nie in Betrieb genommen wurde.

Zahlreiche Messkampagnen mit unterschiedlichsten Anwendungen und Entwicklungen folgten an den Flughäfen Frankfurt, Istres, München, Oberpfaffenhofen, Tarbes und Toulouse. Während der WakeOP-Kampagne im Jahr 2001 wurden gemeinsam mit Kollegen vom *Office national d'études et de recherches aérospatiales* (ONERA) und der *Defence Evaluation and Research Agency* (DERA) drei Continuous-Wave-Lidar-Systeme am Flughafen Oberpfaffenhofen betrieben, um gleichzeitig die Wirbelschleppen des Forschungsflugzeugs *Advanced Technologies Testing Aircraft System* (ATTAS) zu vermessen. Mit Methoden der Triangulation wurden die Positionen der Wirbelkerne und ihre Abstände mit hoher Genauigkeit bestimmt. Später konnte gezeigt werden, dass auch ein gepulstes 2  $\mu\text{m}$ -Doppler-Lidar, trotz seiner großen Pulslänge von etwa 100 m, die Wirbel von ihrer Entstehung bis zu einem fortgeschrittenen Stadium des Zerfalls charakterisieren kann (KÖPP et al. 2004). Hohe Genauigkeiten der Wirbeltrajektorien und Zirkulation werden allerdings nur mit einem aufwändigen interaktiven Auswertalgorithmus erzielt. Jedoch

können mit dem Lidar alternierend auch Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit und der turbulenten Dissipationsrate bestimmt werden - beides Größen, die das Geschick der Wirbel stark beeinflussen.

Mit dem Airbus A380 wurde im Oktober 2007 ein Flugzeug in Betrieb genommen, dessen Spannweite und Gewicht frühere Flugzeuge deutlich übertrifft. Um geeignete Sicherheitsabstände zu anderen Flugzeugen festzulegen, hat Airbus ein noch nie dagewesenes Testprogramm mit 388 Flugstunden durchgeführt. Zwischen Mai 2005 und Dezember 2007 wurden über 600 Überflüge mit Lidar vermessen und eine einzigartige Datenbasis der Wirbelcharakteristiken der A380 und der Referenzflugzeuge A340 und B747 erstellt. Im August 2006 beobachteten hunderte Neugieriger, wie die A380 und eine B747 der Lufthansa über München ihre Kreise zogen, während am Flughafen Oberpfaffenhofen die Wirbelschleppen bei verschiedenen Flugzeugkonfigurationen mit Lidar vermessen wurden.

Das Testprogramm erreichte seinen Höhepunkt mit innovativen Lidar-Messungen an Bord des Forschungsflugzeugs Falcon (Abbildung 13-3). Zur Markierung der Nachlaufwirbel wurden Rauchgeneratoren an den Flügeln montiert oder Kerosin in die Triebwerksstrahlen eingespritzt. Durch den unmittelbaren Vergleich der Wirbelschleppen, der Flügelspitze an Flügelspitze fliegenden A380 und A340, konnte der Einfluss der Variabilität der Atmosphäre minimiert werden. Die Lidar Messungen ermöglichten es, die A380-Separationen vom vorläufigen Wert von 10 NM auf 6 NM, 7 NM beziehungsweise 8 NM für nachfolgende Flugzeuge der Gewichtsklassen Heavy, Medium beziehungsweise Light zu reduzieren (siehe Tabelle 13-1). Der Zuschlag von 2 NM gegenüber Heavys ergibt sich durch Aufrunden und einem Sicherheitszuschlag von 1 NM.

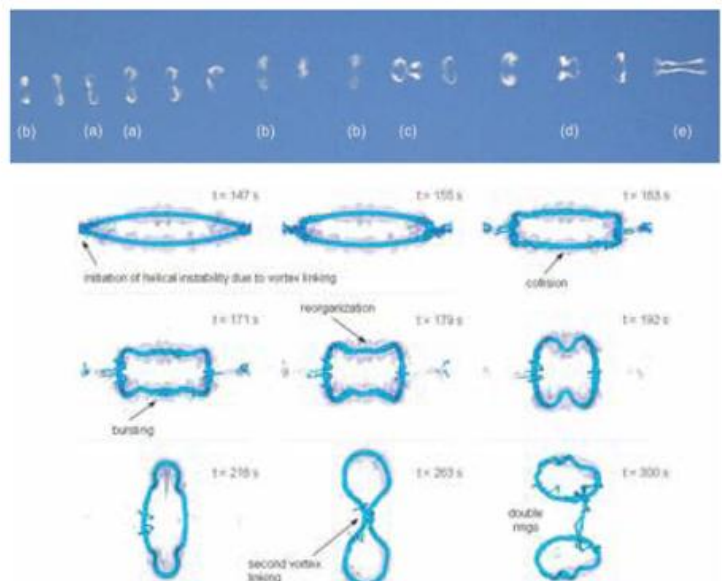


Abb. 13-4: Phasen der Wirbelringentwicklung (oben, Foto: Sven Lütke). Unten: LES der Wirbelschleppe in schwach turbulenter Umgebung (reproduziert aus MISAKA et al. 2012).

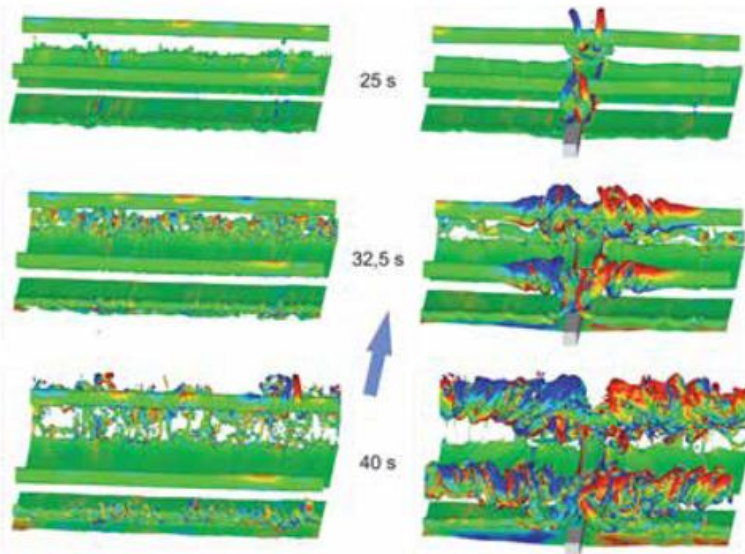


Abb. 13-5: Wandauflösende LES der Wirbelschleppenentwicklung in Bodennähe mit turbulentem Querwind. Links ohne und rechts mit Hindernis am Boden.

## 2.2 Grobstruktur-Simulation

Die hochauflösende Grobstruktursimulation (*Large Eddy Simulation, LES*) auf Supercomputern gewährt instruktive Einblicke in das Verhalten und die Physik der Wirbelschleppes bei unterschiedlichsten Umgebungsbedingungen (PROCTOR und SWITZER 2000, DE VISSCHER et al. 2013). Sie leistet damit wertvolle Orientierungshilfe bei der Entwicklung schneller Wirbelschleppenvorhersagemodelle, die wiederum elementare Komponenten von Wirbelschleppenwarnsystemen sind. LES von Wirbelschleppen wurden in turbulenten, thermisch stabil geschichteten und geschernten Umgebungen sowie in konvektiven Grenzschichten durchgeführt. Dabei wurde unter anderem der zweiphasige Zerfallsprozess der Wirbelschleppes entdeckt, der später durch Lidar Messungen bestätigt wurde. Auch die Einbindung des Triebwerkstrahls in die absinkende Wirbelschleppes, mit den darauf folgenden Mischungs- und Verdünnungsprozessen der Abgase, waren Gegenstand von LES.

Die hier vorgestellten LES wurden mit MGLET durchgeführt - einem finite Volumenverfahren vierter Ordnung zur Lösung der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen, das das Lagrangesche Dynamische Schließungsmodell verwendet. Die numerischen Experimente nutzen typischerweise kartesische Gitter mit 1 m Auflösung und Rechengebietsgrößen von bis zu  $1024 \times 1024 \times 1024 \text{ m}^3$ . Solch große Rechengebiete mit über einer Milliarde Gitterpunkten werden zum Beispiel verwendet, um große turbulente Längenskalen der umgebenden Atmosphäre zu realisieren. Höhere Auflösungen mit variablen Gitterabständen werden eingesetzt, um die Flugzeugumströmung, die Wirbelkerne oder die Bodengrenzschicht angemessen aufzulösen. Für die massiv parallelen Simulationen werden bis zu 2048 Prozessoren verwendet. Zwei Beispiele sollen die Möglichkeiten der LES exemplarisch darstellen.

Im Reiseflug ist die Umgebungsturbulenz, trotz starker Winde, meist nur schwach. Dafür begrenzt die in dieser

Höhe vorwiegend stabile thermische Schichtung die Lebensdauer der Wirbelschleppen auf etwa drei Minuten. Abbildung 13-4 skizziert die Wirbelentwicklung in einer neutral geschichteten, schwach turbulenten Umgebung, in der sich langlebige Wirbelringe bilden können. Die Photographie (oben) zeigt eine faszinierende Sequenz der Wirbelformen, die durch die LES (unten) schön reproduziert wird: Nach der Verbindung des Wirbelpaars entsteht zunächst ein fast rechteckiger länglicher Wirbelring, an dessen Flanken sich helixförmige Instabilitäten ausbreiten. Der darauf folgende knochenförmige Wirbel verwandelt sich in eine stehende Acht, die sich dann in zwei kleinere Einzelringe aufspaltet, welche später auch wieder zu einem Ring verschmelzen können (MISAKA et al. 2012).

Im Endanflug ist die Wahrscheinlichkeit einer Wirbelschleppenbegegnung am höchsten, da dort die Wirbel nicht ungehindert unter den Flugpfad absinken, sondern durch die Wechselwirkung mit dem Boden wieder aufsteigen können. Bei moderatem Querwind kann es passieren, dass der wiederaufsteigende Luvwirbel genau im Flugpfad eines nachfolgenden Flugzeuges verharrt. In der finalen Flugphase sollten unerwünschte Rollbewegungen des Flugzeuges jedoch unbedingt vermieden werden. Abbildung 13-5 links zeigt die Wechselwirkung der Primärwirbel mit den kohärenten Strukturen, die der Querwind am Boden erzeugt. Bei einem Wirbelalter von etwa 30 Sekunden löst sich die vom Leewirbel (hinten) erzeugte Wirbelschicht vom Boden ab und beginnt um den Primärwirbel zu rotieren (STEPHAN et al. 2013). Dabei entstehen aus den streifenförmigen Übergeschwindigkeiten des Querwindes am Boden (Streaks) Omega-Schleifen, die sich um die Primärwirbel wickeln und den Wirbelzerfall einleiten.

Geeignete Hindernisse am Boden (siehe Abbildung 13-5, rechts) können kräftige Sekundärwirbel auslösen, die dort wo die meisten Wirbelbegegnungen stattfinden, den Wirbelzerfall maßgeblich beschleunigen. An Flughäfen sollen anstatt der massiven Rechteckprofile leicht montierbare Plattenreihen installiert werden. Diese Idee nutzt gezielt Eigenschaften der Wirbeldynamik, um den Wirbelzerfall in Landebahnnähe zu beschleunigen. Abbildung 13-5 rechts gibt die einzelnen Schritte wieder:

- Frühe Ablösung kräftiger omega-förmiger Sekundärwirbel,
- Omega-Form bewirkt schnelle Annäherung an Primärwirbel durch Selbstinduktion,
- nachdem sich der Sekundärwirbel um den Primärwirbel gewickelt hat, breitet er sich – wiederum durch Selbstinduktion – in beide Richtungen entlang des Primärwirbels aus,
- der künstliche Wirbel bleibt mit dem regulären Bodenwirbel verbunden und bezieht dadurch von diesem weiterhin Energie,
- die intensive Interaktion der Primär- und Sekundär-

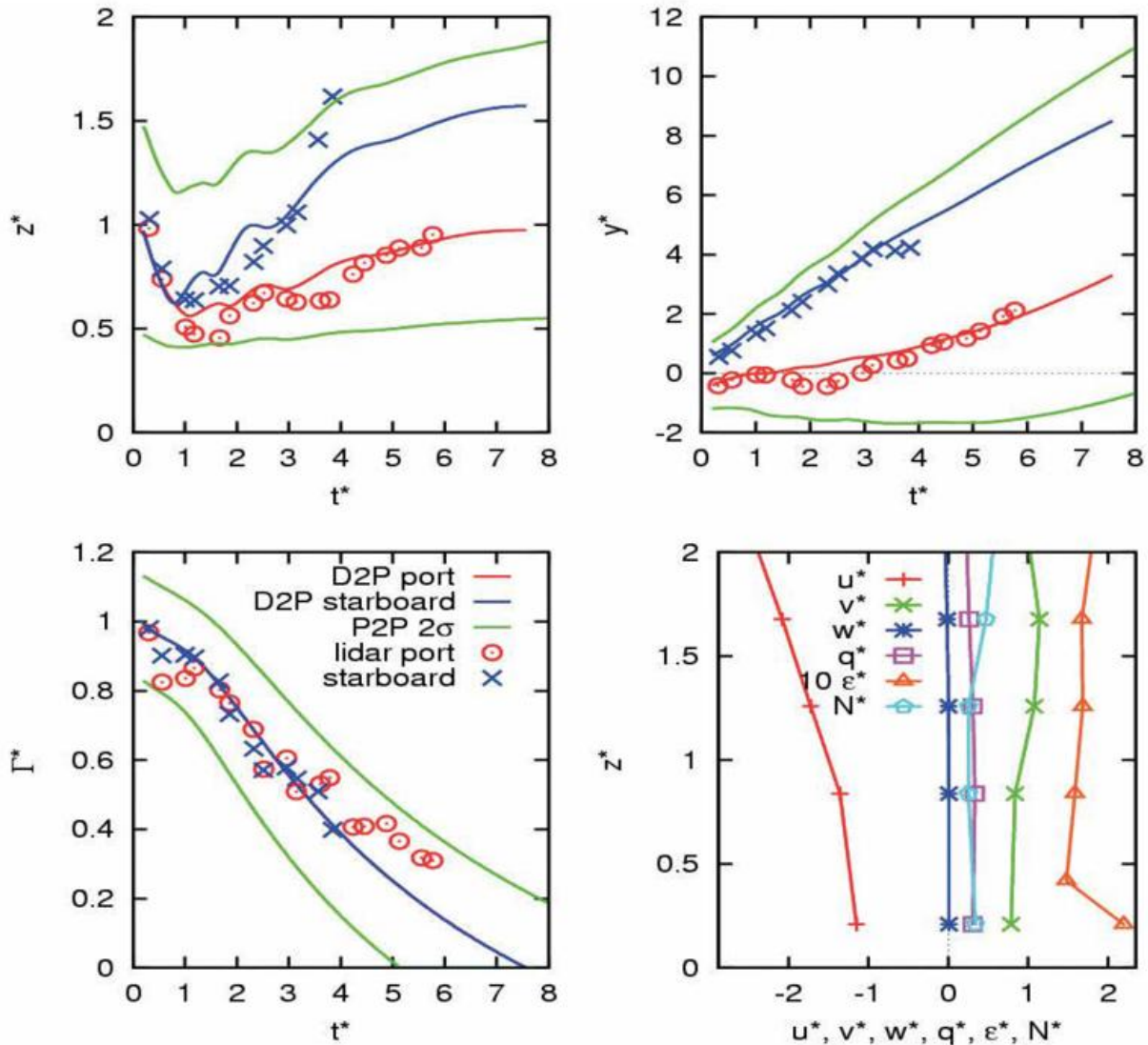


Abb. 13-6: Entwicklung der normierten vertikalen ( $z^*$ ) und lateralen Positionen ( $y^*$ ) und der Zirkulation ( $\Gamma^*$ ) der Wirbelschleppes am Boden. Messungen mit Lidar (Symbole) und Vorhersagen mit P2P-Wirbelschleppenmodell (Linien). Blaue und rote Linien bezeichnen deterministische Vorhersagen; grüne Linien probabilistische Einhüllende (95,4 %). Unten rechts vertikale Profile der normierten gemessenen meteorologischen Parameter.

wirbel, bewirkt einen rapiden Wirbelzerfall, unabhängig von den vorherrschenden Wetterbedingungen.

Im April 2013 wurden Feldexperimente mit dem Forschungsflugzeug HALO am Flughafen Oberpfaffenhofen durchgeführt, die die Wirkung des unter der Nummer DE 10 2011 010 147 patentierten Ansatzes belegen. Wie bei der hier vorgestellten Interaktion mit dem Boden, können Effekte der Turbulenz, thermischer Schichtung und Scherung (HOLZÄPFEL et al. 2003), aber auch Phänomene wie Wirbelaufplatzen oder die Bildung von Wirbeltrichtern (MISAKA et al. 2012), durch die Wechselwirkung primärer und sekundärer kohärenter Wirbelstrukturen gedeutet werden.

### 3 Modellbildung für die Luftfahrt

Um schnelle und zuverlässige Wirbelschleppenwarnsysteme zu entwickeln, müssen zunächst komplexe Komponenten (Flugzeugtrajektorien, Flugzeugparameter, me-

teorologische Bedingungen, Wirbelschleppen Verhalten, Sicherheitsabstände) angemessen vereinfacht und modelliert werden. Die Herausforderung liegt darin, einen optimalen Vereinfachungsgrad der Teilmodelle zu finden, der einerseits Echtzeitbetrieb erlaubt und andererseits seltene aber sicherheitsrelevante Ereignisse abdeckt. Exemplarisch wird hier das Probabilistische 2-Phasen Wirbelschleppentransport- und Zerfallsmodell P2P (HOLZÄPFEL 2003) vorgestellt.

Zunächst wurde P2P zur Prognose des Wirbelverhaltens bei Landungen entwickelt. Später wurde es auf Starts und den Reiseflug erweitert. P2P berücksichtigt alle relevanten flugzeugseitigen Parameter (Masse, Spannweite, Geschwindigkeit, Ort, Lagewinkel) und meteorologischen Größen (Wind, Windscherung, Turbulenz, thermische Schichtung, Dichte, Boden). Das Modell prognostiziert sowohl das deterministische (mittlere) Wirbelverhalten (D2P) als auch probabilistische Einhüllende der Wirbelposition und Stärke (P2P). Abbildung 13-6 zeigt exempla-

risch das asymmetrische Wiederaufsteigen der Wirbel in einer Querwindssituation kurz vor der Landebahn (Backbordwirbel rot, Steuerbordwirbel blau). Fast alle Lidar-Messungen (Symbole) liegen innerhalb der grünen prognostizierten probabilistischen Einhüllenden.

Das Modelldesign ruht auf vier Säulen:

1. Das Modell ist dimensionslos formuliert. Bei Verwendung der charakteristischen Größen anfänglicher Wirbelabstand  $b_0$  und Zirkulation  $\Gamma_0$  ergibt sich die Zeitskala  $t_0 = 2\pi b_0^2/\Gamma_0$ , die der Zeit entspricht, in der die Wirbel um einen Wirbelabstand absinken. Die Normierung ermöglicht das Wirbelschleppenmodell für vielfältige Luftfahrzeugtypen und Umgebungsbedingungen anzuwenden.
2. Die Gleichungen für den Zirkulationsverlauf und das Absinken basieren auf der exakten Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen für den laminar zerfallenden Potentialwirbel. Die Gleichungen wurden so erweitert, dass sie das Verhalten turbulenter Wirbelpaare wiedergeben können.
3. Parameter der Gleichungen wurden an Ergebnisse von LES-Simulationen des DLR und der *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) (PROCTOR und SWITZER 2000) angepasst. Präzise deterministische Wirbelschleppenprognosen sind in der Praxis kaum möglich. Die stochastische Natur der turbulenten Atmosphäre deformiert und transportiert die Wirbel in vielfältiger Weise, was zu erheblichen Bandbreiten von Wirbelposition und Stärke in Ort und Zeit führen kann (siehe Abbildung 13-4). Auch die Flugzeugparameter sind nie genau bekannt. Daher prognostiziert P2P primär Vertrauensintervalle der Wirbelparameter. Es kombiniert verschiedene statische und dynamische Sicherheitszuschläge und wurde
4. mit Daten aus Feldmessungen kalibriert, so dass letztlich Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Wirbelparameter prognostiziert werden können. Mit diesen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen kann die Prognose an das benötigte Wahrscheinlichkeitsniveau angepasst werden. Die Rechenzeit variiert je nach Anwendung zwischen etwa 0,001 s und 0,01 s.

Bislang wurde P2P mit Messdaten aus zwei US- und über sechs europäischen Messkampagnen mit insgesamt über 10 000 Fällen validiert. Dabei wurde es auf vielfältige Flugzeugtypen und Flugphasen inklusive Anflug, Landung, Start, Abflug und Cruise angewandt. Ein standardisiertes Bewertungsverfahren zeigt, dass die Abweichungen zwischen Messung und Vorhersage über die Jahre kontinuierlich abnehmen. Dies belegt wiederum die Fortschritte in Simulation, Messung und Analyseverfahren.

#### 4 Wirbelschleppensysteme

Dieses Kapitel beschreibt die bodengebundenen und flugzeuggestützten Wirbelschleppenwarnsysteme WSVBS und

WEPS sowie das Luftraum-Simulationssystem „Wake-Scene“ zur Sensitivitäts- und Risikoanalyse.

#### 4.1 WSVBS

Das Wirbelschleppenvorhersage- und beobachtungssystem (WSVBS) wurde für die taktische Steigerung der Flughafen Kapazität für eng benachbarte und einzelne Landebahnen konzipiert (HOLZÄPFEL et al. 2009). Vorläufersysteme waren das Wirbelschleppenwarnsystem (WSWS) der Deutschen Flugsicherung (GURKE und LAFFERTON 1997) und das *Aircraft Vortex Spacing System* (AVOSS) der NASA (HINTON et al. 2000). Das WSVBS soll eine dynamische Optimierung der Flugzeugabstände in Abhängigkeit des wetterbedingten Wirbelverhaltens ermöglichen, ohne dabei die Sicherheit einzuschränken. Dazu prognostiziert es den Wirbeltransport und Zerfall inklusive dynamischer Sicherheitsabstände zum Wirbel entlang des Gleitpfades vom *Final Approach Fix* bis zur Landebahnschwelle.

Der Engpass eines derartigen Landebahnsystems liegt in Bodennähe, da dort wiederaufsteigende Wirbel im Flugkorridor verharren können. Daher wird dort die beste Prognosequalität benötigt, die mit direkten Messungen der meteorologischen Parameter, mit zum Beispiel einem *Sound Detecting And Ranging/Radio Acoustic Sounding System* (SODAR/RASS) und einem Ultraschallanemometer, erzielt wird. Da man nicht den gesamten Gleitpfad derartig instrumentieren kann, werden dort die meteorologischen Bedingungen mit dem numerischen Wettervorhersagemodell *Consortium for Small-Scale Modelling-Airport* (COSMO-Airport) prognostiziert. COSMO-Airport kann als zeitverzögertes Ensemble betrieben werden, wobei die Anfangsbedingung stündlich unter Assimilation lokaler Messdaten (von zum Beispiel Regenradar, *Aircraft Meteorological Data Relay* (AMDR), synoptischer *Observation* (SYNOP) und Radiosondenaufstiegen (TEMPS)) bestimmt werden. Damit prognostiziert das P2P-Modell Einhüllende der Wirbelposition und Stärke der Wirbelschleppen in 13 ausgewählten Stationen entlang des Gleitpfades. Dazu addiert die *Simplified Hazard Area Prediction Method* (SHAPE) Sicherheitsabstände zur Wirbelschleppe, die einen sicheren und ungestörten Anflug gewährleisten. Diese Prognosen können optional für Gewichtsklassenkombinationen (zum Beispiel heavy/medium) oder individuelle Flugzeugtypenpaare erstellt werden. Der Zeitpunkt, an dem die berechneten Sicherheitsgebiete nicht mehr mit dem Flugkorridor überlappen, bestimmt die empfohlenen zeitlichen Flugzeugseparationen. Diese zeitlichen Abstände können vom Arrival Manager (AMAN) des DLR in räumliche Abstände etablierter Anflugverfahren übersetzt werden. Mit dem Lidar werden die Prognosen des WSVBS überwacht.

Eine Demonstrationenkampagne für das Parallelbahnsystem des Frankfurter Flughafens zeigte, dass die Betriebsverfahren zur Optimierung der Wirbelschleppenstaffelung in 75 % der Zeit nutzbar gewesen wären (GERZ et al. 2009). Das WSVBS lief stabil und die vorhergesagten

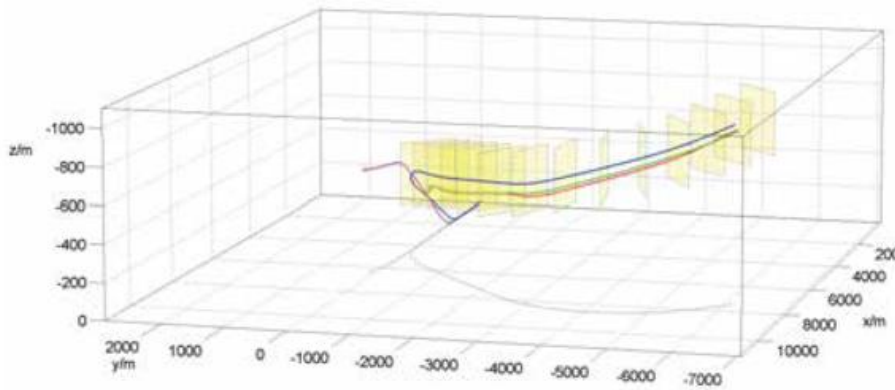


Abb. 13-7: WakeScene-Simulation von Abflügen. Momentaufnahme der Trajektorien des wirbelgenerierenden Flugzeugs (blau) und des nachfolgenden Flugzeugs (lila) mit den erzeugten Wirbelschleppen (Steuerbordwirbel grün, Backbordwirbel rot). Außerdem Projektionen der Trajektorien auf vertikale und horizontale Ebenen sowie gelbe Ebenen, in die die Wirbelschleppen berechnet werden.

Staffelungen wurden zu 100 % durch Lidar-Messungen bestätigt. Schnellzeitsimulationen schätzen den Kapazitätsgewinn unter Berücksichtigung eines realistischen Verkehrsmix und operativer Einschränkungen auf etwa 3 %. Das WSVBS zur Prognose dynamischer paarweiser Separationen wurde am Flughafen München im Sommer 2010 und Frühling 2011 erprobt.

#### 4.2 WEPS

In SESAR wird gemeinsam mit Airbus auch ein flugzeuggestütztes Wirbelschleppenwarnsystem entwickelt - das sogenannte *Wake Encounter Prevention System* (WEPS). Die Vorhersage der Wirbelschleppen benachbarter Flugzeuge ermöglicht die Vermeidung unerwünschter Wirbelbegegnungen durch relativ einfache und kleine Flugmanöver. Die dafür benötigten Flugzeug- und meteorologische Daten werden über Datenlink (zum Beispiel den *Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*, ADS-B) übertragen. Die vorhandenen Messungen verschiedener Flugzeuge von Wind und Temperatur werden mit Kalman-Filtern zu einer optimalen Schätzung der meteorologischen Bedingungen fusioniert.

#### 4.3 WakeScene

Das *Wake Vortex Scenarios Simulation* Softwarepaket (WakeScene) ermöglicht es die Wahrscheinlichkeit von Wirbelbegegnungen für verschiedene Szenarien des Luftverkehrs zu bestimmen (HOLZÄPFEL und KLADETZKE 2011). WakeScene unterstützt Sensitivitätsanalysen, Optimierungen und Risikobewertungen neuer Wirbelschleppenwarnsysteme, neuer Verfahren der Luftverkehrskontrolle und auch neuer Flugzeugtypen oder gar die Ausarbeitung einer neuen Staffelungsmatrix (RECAT). Abbildung 13-7 zeigt eine Momentaufnahme einer Simulation von Starts mit divergierenden Flugrouten am Flughafen Frankfurt. Da das nachfolgende Flugzeug (lila Trajektorie) erst spät abhebt und steil steigt, fliegt es bereits in geringer Höhe in die Wirbelschlepp des zuvor gestarteten Flugzeugs (blaue Trajektorie) ein.

WakeScene eignet sich gleichermaßen für Monte-Carlo-Simulationen und definierte Parametervariationen und erstellt statistische Analysen. Das Paket besteht aus Elementen, die den Verkehrsmix, die Flugzeugtrajektorien, die meteorologischen Bedingungen, das Wirbelverhalten und die potentiellen Gefährdungsgebiete modellieren. Die Flugzeugtrajektorien werden mit Punktmassmodellen oder Flugmanagementsystemen simuliert. Die einjährige meteorologische Datenbasis enthält Vertikalprofile der benötigten Parameter entlang der Gleitpfade des Flughafens Frankfurt in zehnmütiger Auflösung, welche mit einem numerischen Wettervor-

hersagemodell produziert wurden. Damit prognostiziert das P2P-Modell die Wirbeltrajektorien und Zirkulationen. Die Schwere potentieller Wirbelbegegnungen kann mit dem Airbus-Modell *Vortex Encounter Severity Assessment* (VESA) im Detail bestimmt werden (KAUERTZ et al. 2012).

Umfassende Sensitivitätsanalysen mit WakeScene wurden im EU-Projekt *Crosswind-Reduced Separations for Departure Operations* (CREDOS) für Starts bei Querwind durchgeführt (HOLZÄPFEL und KLADETZKE 2011). Demnach könnten bei Querwinden über 8 kt in 10 m Höhe die Flugzeugseparationen von 120 s auf 60 s reduziert werden. Divergierende Abflugrouten und die Drehung des Windes mit der Höhe (Ekman-Spirale) verhindern die Nutzung geringerer Querwindsschwellenwerte.

### 5 Bewertung und Ausblick

Stetige Entwicklungen der Lidar-Messtechnik und der numerischen Grobstruktursimulation haben ein gutes Verständnis der meteorologischen Einflüsse und des Bodens auf den Transport, die Stärke und Topologie der Wirbelschlepp ermöglicht. Inzwischen können sogar spezielle Phänomene wie das Wirbelaufplatzen oder die Entstehung von Wirbeltrichtern simuliert und erklärt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Entwicklung des schnellen, robusten und inzwischen gut validierten Wirbelschleppenmodells P2P genutzt. Mit weiteren Modellen und Datenbasen für Flugzeugtrajektorien, Flugzeugparameter, meteorologische Bedingungen und Sicherheitsgebiete, wurden Wirbelschleppenwarnsysteme für Landung, Start und Reiseflug, für einzelne und eng benachbarte Landebahnen sowie für Flugzeug Gewichtsklassenkombinationen und paarweise dynamische Separationen konzipiert und entwickelt (WSVBS, WEPS). Demonstrationskampagnen an den Flughäfen Frankfurt und München haben die Funktionalität der Systeme und die potentiellen Kapazitätsgewinne belegt. Softwarepakete zur Optimierung und Risikoanalyse dieser Systeme stehen zur Verfügung (WakeScene).

Nichtsdestotrotz ist weitere Forschung notwendig. Beispielsweise belegen sowohl Simulationen als auch Feldmessungen, dass Flugzeuge kurz vor der Landung häufig in geringem Abstand von oder sogar durch noch nicht vollständig zerfallene Wirbelschleppen fliegen. Um sichere und effiziente Warnsysteme zu entwickeln, muss genau verstanden werden, warum Landungen dennoch sicher sind. Möglicherweise können die vorgeschlagenen Plattenreihen zur Beschleunigung des Wirbelzerfalls in der kritischen Flugphase vor dem Aufsetzen, die Sicherheit und den Kapazitätsgewinn von Wirbelschleppenwarnsystemen signifikant erhöhen. Obgleich diese Systeme prinzipiell bereits verfügbar sind, müssen sie teilweise weiter optimiert werden und Risikoanalysen müssen ihre Sicherheit nachweisen, bevor sie tatsächlich an Flughäfen oder in Flugzeugen eingesetzt werden können. Ein verstärktes Augenmerk wird auch Wirbelschleppenrisiken im zukünftigen liberalisierten SESAR- beziehungsweise NextGen-Luftraum gewidmet werden müssen. Schließlich wird die neue Methode zur integrierten numerischen Simulation des Aufrollvorganges inklusive der Flugzeugumströmung tiefere Einblicke in den Einfluss von Flugzeugkonfiguration und Typ sowie Flugmanövern auf die Eigenschaften der Wirbel und ihren Zerfall gewähren.

## Literatur

- BREITSAMTER, C., 2011: Wake vortex characteristics of transport aircraft. *Progr. Aerosp. Sci.* **47**, 89-134, DOI: 10.1016/j.paerosci.2010.09.002.
- DE VISSCHER, I., BRICTEUX, L., WINCKELMANS, G., 2013: Aircraft Vortices in Stably Stratified and Weakly Turbulent Atmospheres: Simulation and Modeling. *AIAA J.* **51**, 551-566.
- GERZ, T., HOLZÄPFEL, F., DARRACQ, D., 2002: Commercial aircraft wake vortices. *Progr. Aerosp. Sci.* **38**, 181-208, DOI: 10.1016/S0376-0421(02)00004-0.
- GERZ, T., F. HOLZÄPFEL, W. GERLING, A. SCHARNWEBER, M. FRECH, K. KOBER, K. DENGLER, S. RAHM, 2009: The Wake Vortex Prediction and Monitoring System WSVBS, Part II: Performance and ATC Integration at Frankfurt Airport. *Air Traffic Control Quart.* **17**, 323-346.
- GURKE, T., LAFFERTON, H., 1997: The development of the wake vortex warning system for Frankfurt Airport: Theory and implementation. *Air Traffic Control Quart.* **5**, 3-29.
- HALLOCK, J.N., GREENE, G.C., BURNHAM, D.C., 1998: Wake Vortex Research – A Retrospective Look. *Air Traffic Control Quart.* **6**, 161-178.
- HINTON, D.A., CHARNOCK, J.K., BAGWELL, D.R., 2000: Design of an Aircraft Vortex Spacing System for Airport Capacity Improvement. *AIAA Paper* 2000-0622, 1-18.
- HOLZÄPFEL, F., 2003: Probabilistic Two-Phase Wake Vortex Decay and Transport Model. *J. Aircraft* **40**, 323-331, DOI: 10.2514/2.3096.
- HOLZÄPFEL, F., HOFBAUER, T., DARRACQ, D., MOET, H., GARNIER, F., FERREIRA GAGO, C., 2003: Analysis of wake vortex decay mechanisms in the atmosphere. *Aerosp. Sci. Technol.* **7**, 263-275, DOI: 10.1016/S1270-9638(03)00026-9.
- HOLZÄPFEL, F., T. GERZ, M. FRECH, A. TAFFERNER, F. KÖPP, I. SMALIKHO, S. RAHM, K.-U. HAHN, C. SCHWARZ, 2009: The Wake Vortex Prediction and Monitoring System WSVBS - Part I: Design. *Air Traffic Control Quart.* **17**, 301-322.
- HOLZÄPFEL, F., KLADETZKE, J., 2011: Assessment of Wake Vortex Encounter Probabilities for Crosswind Departure Scenarios. *J. Aircraft* **48**, 812-822, DOI: 10.2514/1.C000236
- KAUERTZ, S., HOLZÄPFEL, F., KLADETZKE, J., 2012: Wake Vortex Encounter Risk Assessment for Crosswind Departures. *J. Aircraft* **49**, 281-291, DOI: 10.2514/1.C031522.
- KÖPP, F., RAHM, S., SMALIKHO, I., 2004: Characterization of Aircraft Wake Vortices by 2-µm Pulsed Doppler Lidar. *J. Atmosph. Ocean. Techn.* **21**, 194-206, DOI: 10.1175/1520-0426(2004)021<0194:COAWVB>2.0.CO;2.
- LANCHESTER, F.W., 1907: *Aerodynamics*. Constable, London.
- MISAKA, T., HOLZÄPFEL, F., GERZ, T., MANHART, M., SCHWERTFIRM, F., 2012: Vortex bursting and tracer transport of a counter-rotating vortex pair. *Phys. Fluids* **24**, 25104-1 – 25104-21, DOI: 10.1063/1.3684990.
- PRANDTL, L., 1918: *Tragflügeltheorie*. I. Mitteilung, *Nachrichten der K. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, Mathematisch-physikalische Klasse, 451-477.
- PROCTOR, F.H., SWITZER, G.F., 2000: Numerical Simulation of Aircraft Trailing Vortices, Proc. 9th Conf. Aviation, Range Aerosp. Meteor., Paper 7.12, 511-516.
- ROSSOW, V.J., 1999: Lift-generated vortex wakes of subsonic transport aircraft. *Progr. Aerosp. Sci.* **35**, 507-660.
- SPALART, P.R., 1998: Airplane Trailing Vortices. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **30**, 107-138.
- SAFO 12007, 2012, Safety Alert for Operators, Federal Aviation Administration, [http://www.faa.gov/other\\_visit/aviation\\_industry/airline\\_operators/airline\\_safety/safo](http://www.faa.gov/other_visit/aviation_industry/airline_operators/airline_safety/safo).
- STEPHAN, A., HOLZÄPFEL, F., MISAKA, T., 2013: Aircraft Wake-Vortex Decay in Ground Proximity - Physical Mechanisms and Artificial Enhancement. *J. Aircraft* **50**, 1250-1260, DOI:10.2514/1.C032179.

M. RASCHENDORFER, A. BARLEBEN

# 14 Vorhersage fluggefährdender Turbulenz und ihre Registrierung

Forecast of hazardous turbulence for aviation and its registration

## Zusammenfassung

Bislang gründen die benutzten Methoden zur Turbulenzvorhersage für die Luftfahrt noch zu häufig auf subjektiven und damit recht unzuverlässigen Einschätzungen, die den steigenden Kundenanforderungen nicht mehr genügen. Weil sich bislang auch durch die Nutzung verschiedenster aus NWV-Modellen abgeleiteter Turbulenzindizes (etwa des Ellrod-Indexes) kein wesentlicher Fortschritt erreichen ließ, fordert die ICAO die Entwicklung neuer Methoden, durch welche die Vorhersage der „Eddy Dissipation Rate“ (EDR), also der Dissipationssenke von Turbulenter Kinetischer Energie (TKE), ermöglicht wird. Diese Größe ist ein tatsächliches atmosphärisches Turbulenzmaß und zeichnet sich dadurch aus, dass sie eindeutig sowohl aus NWV-Modellen als auch aus Flugzeugmessungen abgeleitet werden kann. Beim DWD wird seit Kurzem ein Vorhersageverfahren eingesetzt, das auf der EDR-Berechnung durch das Turbulenzschema des COSMO-Modells basiert und durch Berücksichtigung bislang fehlender Quellterme der TKE aber auch durch Anpassung an EDR-Messungen US-amerikanischer Flugzeuge deutlich verbessert werden konnte.

## Summary

Rather often, methods of forecasting the danger to aviation by turbulence are still based on subjective estimates, which can't meet the increasing requirements of customers any longer. As even the use of various turbulence indices (like the Ellrod-index) derived from NWV models could not establish a substantial improvement, ICAO requirements suggest the development of new methods facilitating the forecast of Eddy Dissipation Rate (EDR). This real property of atmospheric turbulence is the main sink term of Turbulent Kinetic Energy (TKE) and can uniquely be derived from both, NWV models and aircraft measurements. For a short time DWD has been applying a method based on EDR calculated by the turbulence scheme of the COSMO-model. The implementation of so far missing source terms of TKE as well as adaptations to EDR-measurements taken from US aircrafts caused a considerable improvement.

## 1 Einleitung

Zum Teil erhebliche Beeinträchtigungen des Flugverkehrs gehen von „Turbulenzgebieten“ aus, womit atmosphärische Bereiche mit kräftigen Windfluktuationen gemeint sind. Wenn auch Turbulenz häufig nur im Zusammenhang mit vermindertem Passagierkomfort, schnellerer Materialermüdung oder erhöhtem Treibstoffverbrauch genannt wird, so können darüber hinaus immer wieder folgenschwere Flugvorkommnisse bis hin zu Abstürzen auf das Phänomen „Turbulenz“ zurückgeführt werden. Daher legen internationale Regularien der ICAO (Annex 3) fest, dass der gesamte Luftraum zwischen Boden und einer Höhe von in

der Regel 15 km darüber auch bezüglich des Auftretens von Turbulenz zu überwachen ist.

Weil bislang zuverlässige Vorhersagemethoden fehlen, und Überwarnungen zu unnötigen Störungen des Luftverkehrs führen würden, geben *Meteorological Watch Offices* häufig erst dann eine Warnung vor einem Turbulenzgebiet aus, wenn dies bereits durch Pilotenmeldungen, den so genannten „*Pilot Reports*“ (PIREPs), als Gebiet mit zumindest mäßiger Turbulenz gemeldet wurde. Dies führt aber dazu, dass von den etwa 400 Flugvorkommnissen durch Turbulenz, die durchschnittlich innerhalb von drei Jahren über den USA bekannt werden, nur etwa 30 % durch Warnungen

(einschließlich vorhergehender PIREPs) abgedeckt wurden (SHARMAN 2004), was sich trotz merklicher Fortschritte in jüngster Zeit nicht wesentlich verbessern ließ.

Ursache für die schlechte Vorhersagbarkeit des Phänomens Turbulenz ist, dass es sich hierbei um die Auswirkungen von recht energiereichen Strömungsmustern handelt, deren räumliche Skala nur durch die Flugzeugabmessungen nach unten begrenzt ist. Solch kleinräumige Strukturen sind aber von den Rechengittern heutiger Modelle zur Numerischen Wettervorhersage (NWV) eindeutig nicht aufgelöst. Es handelt sich daher (bislang) um ein sogenanntes Sub(-Gitter-) Skaliges (SGS-) Phänomen, das auch in absehbarer Zukunft nur durch ein zusätzliches Turbulenzmodell beschrieben werden kann. Selbst aber eine genügend hohe räumliche Auflösung kann nur bedingt helfen, weil dann andere Modellunsicherheiten stärker zum Tragen kommen (Zunahme der stochastischen Anteile der Modellrechnung), was dann wohl nur durch statistische Anschlussrechnungen ausgeglichen werden kann.

## 2 Ausgangssituation

Auf Grund der prinzipiellen Schwierigkeiten bei der Turbulenzvorhersage ist für die Flugwetterberatung an den Luftfahrtberatungszentralen des DWD nach wie vor die individuelle Erfahrung des Flugwetterberaters unter Berücksichtigung allgemeiner Erkenntnisse über das Auftreten von starker Turbulenz wichtig. So ist etwa konvektive Bewölkung immer auch mit starken kleinräumigen Mustern der Vertikalgeschwindigkeit verbunden und zeigt somit Turbulenz an. Heimtückischer ist aber Turbulenz in Abwesenheit von Wolken, die so genannte „*Clear Air Turbulence*“ (CAT). Während an Wolken gebundene Turbulenz überwiegend durch Auftriebskräfte erzeugt wird (Konvektion) und somit vor allem ein Phänomen bei labiler thermischer Schichtung ist, tritt CAT meist bei mäßig stabiler Schichtung im Zusammenhang mit Kelvin-Helmholtz-Wellen (angetrieben durch eine starke Windscherung) oder auch in Verbindung mit Schwerewellen und Rotoren (ausgelöst durch Formwiderstandskräfte einer stark gegliederten Landoberfläche) auf. Obwohl Wellen des Strömungsfeldes gewisse Merkmale, die mit Turbulenz in Verbindung gebracht werden (Isotropie, Wirbeligkeit), nicht besitzen, werden sie aber dennoch im Flugzeug unter Umständen bereits als heftiges „Auf und Ab“ wahrgenommen. Erst brechende Wellen weisen dann auch die erwähnten Turbulenzeigenschaften auf. CAT-Gebiete in Verbindung mit Windscherungszonen deutlich oberhalb der Grenzschicht haben in der Regel eine vertikale Erstreckung von 500 bis 1000 m und eine horizontale Ausdehnung von 60 bis 80 km (SHARMAN 2002) und sind häufig in der Nähe des Strahlstroms in Regionen starker vertikaler oder auch horizontaler Scherung zu finden, was besonders im Bereich deutlicher Isobarenkrümmung (Flanken von Trögen und Keilen) der Fall ist.

In niedrigeren Flughöhen deutlich unterhalb der Tropopause sind CAT-Gebiete häufig oberhalb von Gebirgszügen zu

finden, wo sich der Formwiderstand der Gebirgsrauigkeit auswirkt. CAT-Felder sind hier auch mit horizontal ausbreitenden Schwerewellen verbunden, die erwartet werden können, wenn die Windgeschwindigkeit etwa 2000 m über dem Kammniveau eines Gebirgszuges über dem 1,6-fachen derjenigen im Kammbereich selbst liegt (KÜHL 2006). Ein weiteres auffälliges Turbulenzphänomen ist die so genannte „*Convective Induced Turbulence*“ (CIT), das vor allem durch die Scherung der konvektiven Zirkulation erzeugt wird und somit auch im wolkenfreien Absinkbereich konvektiver Zellen auftritt, wo CIT dann einen weiteren Spezialfall von CAT darstellt. Werden CIT-Gebiete von der vertikalen Scherungszone des Strahlstroms erfasst, sind besonders extreme Turbulenzen die Folge. Viele der beschriebenen Turbulenzphänomene wurden in diversen Studien mittels hochaufgelöster Messungen oder direkter numerischer Simulationen charakterisiert (vergleiche SHARMAN 2012). Eine recht umfassende Beschreibung dieser Prozesse (insbesondere im Zusammenhang mit Wolkenbildung) enthält auch der Artikel von LANE et al. (2012). Wenngleich diese Erkenntnisse zu einem tieferen Verständnis führen, kommen sie bislang nur bedingt in NWV-Modellen zur Anwendung. Somit wurden zum Zwecke einer NWV-gestützten Objektivierung in der Vergangenheit eine Vielzahl (wohl über 30) von Kenngrößen für Turbulenz (Turbulenzindizes) entwickelt, die direkt aus den Ausgabefeldern der NWV-Modelle berechnet werden können. Viele von ihnen sind Kombinationen aus vertikaler Scherung (VHS) sowie Deformation (HDF), Divergenz (HDV) oder Wirbelstärke des Horizontalwindes, beziehungsweise auch des Vertikalgradienten potentieller Temperatur. Einer der erfolgreichsten Indizes unter ihnen ist der Ellrod-Index (ELLROD 1992), der sich durch

$$ELD := VSH \cdot (HDF - HDV) \quad (1)$$

ausdrücken lässt. Problematisch ist allerdings, dass gerade die hierzu benötigte Berechnung von horizontalen Richtungsableitungen stark von der Modellauflösung abhängig und somit nicht eindeutig von NWV-Modellen wiedergegeben werden kann. Darüber hinaus ist jeder dieser Indizes immer nur unter bestimmten Bedingungen ein Indikator für Turbulenz. So steht etwa ELD vor allem in enger Beziehung zur Turbulenzerzeugung durch (vom Modell nicht aufgelöste) horizontale Scherwirbel (siehe auch Abschnitt 4.1.3) und lässt sich auch mit der Frontogenese (zeitliche Anstiegsrate des isobaren Temperaturgradienten) in Verbindung bringen. Der Index zeigt daher Turbulenz vor allem in Scherungszonen des Windes (etwa im Bereich von Strahlströmen und Höhenfronten) an. Ein Index für sich allein genommen führt somit (mangels hinreichender Allgemeingültigkeit) recht häufig sowohl zu Überwarnungen als auch zu drastischen Unterschätzungen. Bei verschiedenen Wetterdiensten wird daher versucht, eine geeignete optimale Kombination aus den bekannten Turbulenzindizes abzuleiten, durch welche die geschilderten Mängel der einzelnen Indizes abgemildert werden können. Schon seit einiger Zeit routinetauglich ist der am *National Center of Atmospheric Research* (NCAR) ent-

wickelte Diagnosealgorithmus (SHARMAN 2004, 2005), durch den ein deutlich verbesserter Kombinationsindex im so genannten „Graphic Turbulence Guidance“ (GTG) ausgegeben wird (ELLROD 2010, KIM 2011). Dieser kann in der Form eines gewichteten Mittels einzelner Indizes in verbesserter Weise die beobachteten Schwerestufen abbilden, die aus PIREP-Meldungen oder auch Turbulenzmessungen im Flugzeug (siehe Abschnitt 3) als Maßstab für die Intensität von Turbulenz benutzt werden. Ergänzend hierzu hat sich der DWD in jüngster Zeit besonders darum bemüht, eine möglichst allgemeingültige Turbulenzgröße mit Hilfe eines erweiterten Turbulenzmodells bereitzustellen.

### 3 Das Problem einer geeigneten Turbulenzmessgröße

Eine Grundvoraussetzung für die Ableitung eines solchen optimalen Turbulenzindexes ist aber die Existenz einer eindeutig definierten physikalischen Messgröße, die als Maß für die Stärke der atmosphärischen Turbulenz (und damit auch für die damit verbundenen Auswirkungen auf ein Flugzeug) gelten kann und hinreichend zuverlässig durch NWV-Modelle (etwa auch über einen optimalen Kombinationsindex) berechenbar ist.

Die Frage nach einem geeigneten Turbulenzmaß wurde lange kontrovers diskutiert. Schließlich muss diese Größe zum einen durch die Auswirkungen der Turbulenz auf ein fliegendes Flugzeug messbar und zum anderen aber, als lokale Eigenschaft der Atmosphäre, unabhängig von der Messung selbst sein (insbesondere vom Flugzeug und dessen Manövern).

#### 3.1 Pilotenmeldungen

Die bereits erwähnten PIREPs sind als subjektive Beurteilung der Stärke der atmosphärischen Turbulenz über die „gefühlten“ Auswirkungen auf das Fluggerät sicherlich sowohl vom individuellen Piloten als auch vom Flugzeug (Gewicht, Geschwindigkeit, Abmessungen, Flugmanöver) abhängig und sind damit nur schwer eindeutig quantifizierbar. Ferner ist die Zuordnung zu Raum und Zeit häufig problematisch (SHARMAN 2002) und die Anzahl der Berichte ist äußerst limitiert (in der Größenordnung von 1000 für ein Winterhalbjahr auf dem Gebiet des COSMO-EU).

#### 3.2 Dynamik eines Flugzeugs und Messung der vertikalen Böenstärke

Daneben sind aber viele Linienflugzeuge mit Vertikalbeschleunigungsgebern ausgerüstet, mit denen Abweichungen von der reinen Gravitationsbeschleunigung (Delta g) aufgezeichnet werden. Diese Werte sind aber immer noch vom Flugzeug (insbesondere seiner Masse) abhängig. Diese Registrierungen können aber benutzt werden, um auf die atmosphärische vertikale Böenstärke zu schließen. Die resultierende Auftriebskraft  $m_{Fl} \cdot \ddot{z}$ , die infolge einer auftretenden (meist vertikalen) Windfluktuation relativ zum fliegenden Flugzeug wirkt, ergibt sich nämlich aus folgendem Kräftegleichgewicht:

$$m_{Fl} \cdot (\ddot{z} + g) = \frac{1}{2} A_{Fl} \cdot \left[ C_{Fl_0} + \frac{\partial C_{Fl}}{\partial \alpha} \cdot (\alpha_{Fl} + \alpha_v) \right] \cdot \rho v^2 \approx \frac{1}{2} A_{Fl} \cdot \rho v \cdot [C_{Fl_0} \cdot w + C_{Fl_1} \cdot v] \quad (2)$$

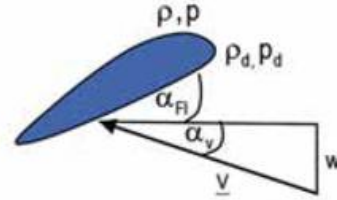


Abb. 14-1: Anströmung einer um den Anstellwinkel  $\alpha_{Fl}$  gegenüber der Horizontalen aufgestellten Tragfläche mit Geschwindigkeitsvektor  $\underline{v}$  und dem Anströmwinkel  $\alpha_v$ , über dem sich die Vertikalwindkomponente  $w$  ergibt. In Flughöhe herrscht die Luftdichte  $\rho$  und der Druck  $p$ . Im frontalen Staupunkt wird die Luft komprimiert, so dass Dichte und Druck ansteigen (Index  $d$ ).

Dabei sind  $m_{Fl}$  Masse und  $A_{Fl}$  Tragfläche des Flugzeugs und  $\ddot{z}$  ist seine Vertikalbeschleunigung.  $C_{Fl}$  ist der flugzeugabhängige Auftriebsbeiwert, der unter anderem vom relativen Anströmwinkel  $\alpha = \alpha_{Fl} + \alpha_v$  also den Anstellwinkeln der Tragfläche  $\alpha_{Fl}$  und der Strömung  $\alpha_v$  (jeweils gegenüber der Horizontalen) abhängig ist (siehe Abb. 14-1) und für frontale Anströmung mit  $C_{Fl_0}$  bezeichnet ist. Bei den im Allgemeinen nur recht kleinen Winkeln kann nun  $\alpha_v \approx wv^{-1}$  gesetzt werden, wobei  $v$  die relative Anströmgeschwindigkeit ist und  $w$  ihre Vertikalwindkomponente darstellt. Obwohl  $C_{Fl_0}$  und  $C_{Fl_1} := \frac{\partial C_{Fl}}{\partial \alpha}$  im Wesentlichen nur vom Flugzeug abhängen, wird sich im Allgemeinen aber  $\alpha_{Fl}$  (und damit auch  $C_{Fl_1} := C_{Fl_0} + C_{Fl_1} \cdot \alpha_{Fl}$ ) im Verlaufe eines Fluges verändern. Mittelwerte über ein Zeitintervall, innerhalb dessen der Vektor des Flugzeugantriebs konstant bleibt, und sich alle turbulenten Schwankungen der reinen Luftströmung herausmitteln, seien mit einem Überstrich gekennzeichnet und Abweichungen hiervon mit einem Beistrich. Es verschwindet dann  $\ddot{z}$ , und  $w'$  beziehungsweise  $v'$  werden nur durch das Windfeld selbst erzeugt. Bei Vernachlässigung von Dichteschwankungen und unter Beachtung von  $|\overline{w'}|, |w'|, |v'| \ll |\overline{v}|$  erhält man dann näherungsweise:

$$m_{Fl} \cdot \ddot{z} \approx \frac{1}{2} A_{Fl} \cdot \overline{\rho} \overline{v} \cdot [C_{Fl_0} \cdot w' + 2C_{Fl_1} \cdot v'] \quad (3)$$

Unter Verwendung von  $\overline{v'^2} = g_{w'} \cdot \overline{w'^2}$  und  $\overline{w'v'} = g_{wv'} \cdot \overline{w'^2}$  ergibt sich schließlich für die Standardabweichungen der Vertikalbeschleunigung  $\sigma_z$  und der vertikalen Windfluktuation  $\sigma_w$  folgender Zusammenhang:

$$\sigma_w = \tau_{FL} \cdot \sigma_z \quad \text{mit der Zeitkonstante} \quad \tau_{FL} = \frac{2m_{Fl}}{A_{Fl} \cdot C_{Fl_1} \cdot \overline{\rho} \overline{v}} \quad (4)$$

Dabei ist  $C_{F_{13}} := \sqrt{C_{F_{13}}^2 + 4C_{F_{13}} \cdot (g_{v'} C_{F_{13}} + g_{uv} C_{F_{13}})}$  der resultierende Korrekturparameter, der nicht nur vom Flugzeug sondern über  $C_{F_{13}}$  auch von der Flugphase und über die Varianzverhältnisse  $g_{v'}$  und  $g_{uv}$  auch noch von der atmosphärischen Vertikalschichtung abhängig ist. Hierbei muss aber der mittlere Massenfluss  $\bar{\rho} \bar{v}$  mit Hilfe der Druckmessungen durch ein (meist) an der Flugzeugspitze angebrachtes Staurohr bestimmt werden. Während die Luft seitlich mit der Geschwindigkeit  $v$  und dem umgebenden Atmosphärendruck  $p$  vorbeistreicht, ruht sie im Staupunkt relativ zum Flugzeug und wird wegen des höheren dynamischen Staudrucks  $p_d$  komprimiert. Verläuft die Kompression adiabatisch, kann für den stationären und reibungsfreien Fall abgeleitet werden:

$$v = \sqrt{\frac{2p}{k\rho} \left[ \left( \frac{p_d}{p} \right)^k - 1 \right]}$$

mit dem zugehörigen Adiabaten-Exponent  $k \approx 2/7$ . (5)

Die hiernach berechnete relative Windgeschwindigkeit heißt auch *True Air Speed* (TAS). Demgegenüber wird aber meist die *Calibrated Air Speed* (CAS) abgeleitet:

$$v_0 = \sqrt{\frac{p_d - p}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{p}{\rho_0} \left[ \frac{p_d}{p} - 1 \right]}$$

(6)

Sie ergibt sich (bei Berücksichtigung einiger Gerätekorrekturen) direkt aus der gemessenen Druckdifferenz  $\bar{p}_d - \bar{p}$ , wenn mit inkompressibler Luft bei der konstanten Referenzdichte  $\rho_0 = 1,225 \text{ kg m}^{-3}$  gerechnet wird, wobei dann  $\rho_0 \cdot v_0^2 = \rho \cdot v^2$  bei gegebener Anströmrichtung ein Maß für die Auftriebskraft eines gegebenen Flugzeugs ist. Gemäß dem Handbuch der WMO zum *Aircraft Meteorological Data Relay* (AMDAR) wird als Turbulenzmaß die sogenannte *Equivalent Vertical Gust Velocity* (DEVG) sinngemäß folgendermaßen festgesetzt:

$$\bar{w} = \frac{B_{F_1} \cdot m_{F_1} \cdot \hat{z}}{\rho_0 v_0 \cdot g}$$

(7)

Sie besitzt dabei als Geschwindigkeitsmaß die Einheit  $\text{ms}^{-1}$ . Einganggröße ist zum einen der maximale Betrag der Vertikalbeschleunigung  $\hat{z}$  innerhalb eines mehrminütigen Intervalls und die CAS zum Zeitpunkt der maximalen Beschleunigung ( $v_0$ ). Der Korrekturfaktor  $B_{F_1}$  ist ein vom Flugzeug und den Flugbedingungen abhängiger Faktor der Dimension  $\text{m}^{-1} \text{s}^{-2}$  und müsste

sich mit  $M := \frac{v^2 \rho}{2 p}$  und  $M_0 := \frac{v_0^2 \rho_0}{2 p}$  nach obiger

Auftriebsformel sowie den Beziehungen für  $v$  beziehungsweise  $v_0$  gemäß

$$\left( \frac{B_{F_1} \cdot A_{F_1} \cdot C_{F_{13}}}{2g} \right)^2 \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\rho_0 v_0^2}{\rho v^2} = \frac{(k \cdot M + 1)^k - 1}{M} = \frac{k M_0}{(M_0 + 1)^k - 1}$$

(8)

darstellen lassen, wenn die DEVG ( $\bar{w}$ ) tatsächlich mit maximalen atmosphärischen Vertikalgeschwindigkeiten verglichen werden soll (und  $\frac{\hat{z}}{\sigma_z} \approx \frac{\bar{w}}{\sigma_w}$  angenommen werden kann).

Eine Vernachlässigung dieses Einflusses von  $\rho$ ,  $p$  beziehungsweise  $M$  oder  $M_0$  entspricht der Annahme  $\rho v = \rho_0 v_0$  und bedeutet eine systematischen Unterschätzung der Turbulenz mit zunehmender Höhe beziehungsweise Fluggeschwindigkeit, während eine nicht korrigierte Erhöhung des Anstellwinkels zu einer systematischen Überschätzung (meist bei niedrigen Höhen beziehungsweise Geschwindigkeiten) führen würde. Dies sollte aber Auswirkungen haben, wenn Vergleiche mit Modelldaten angestellt werden (siehe Abschnitt 5). Da Messwerte der DEVG aber dennoch weitestgehend vom Flugzeug unabhängig sind, wird diese Größe zurzeit in Linienflugzeugen einiger Staaten (zum Beispiel Frankreich, Großbritannien, Australien) als atmosphärisches Turbulenzmaß aufgezeichnet. Allerdings sind bisher nur wenige Messungen verfügbar und ihre Unabhängigkeit vom Flugzeug (beziehungsweise von Flugmanövern) lässt noch Freiraum für Verbesserungen. Weil aber die DEVG die bislang beste über Europa zur Verfügung stehende Turbulenzmessung für den Flugverkehr ist, sollen im internationalen Projekt SESAR (in diesem Heft) DEVG-abbildende Turbulenzindizes der Modelle COSMO-EU, ALADIN (Meteo France) und Global Unified (UK Met Office) gegen DEVG-Messungen verifiziert werden. Vielversprechend sind aber auch direkte Ableitungen des Vertikalwindes, die mit Hilfe der TAS und Messungen der Flugzeuggeschwindigkeit gegenüber dem Erdsystem, der so genannten „*Ground Speed*“ (GS), möglich sind. Dabei kann die GS anhand moderner Positionsdaten ermittelt werden, so dass dann die fehleranfällige Auswertung von Vertikalbeschleunigungen verzichtbar ist.

### 3.3 Die turbulente kinetische Energie und ihre Dissipationsrate

Mit Hilfe von gemessenen Zeitreihen des Vertikalwindes könnte nun auch versucht werden, die (Massendichte der) Turbulente Kinetische Energie (TKE) der Atmosphäre zu bestimmen, die sich als direktes Maß für die atmosphärische Turbulenz aufdrängt. Gemäß

$$\text{TKE}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \overline{v_i^2}(\mathbf{r})$$

stellt diese somit die (halbe) Summe der Varianzen  $\overline{v_i^2}$  aller drei Windkomponenten  $v_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) dar und besitzt somit die Einheit  $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ .

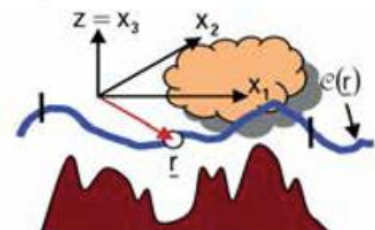


Abb. 14-2: Veranschaulichung eines gleitenden Mittelungsintervalls entlang einer Flugstrecke  $e(\mathbf{r})$  vorgegebener Länge, begrenzt durch senkrechte Striche mit dem Bezugspunkt  $\mathbf{r}$  auf halber Strecke.

Der Varianzbildung liegt dabei ein Mittelungsoperator zugrunde (markiert durch einen Überstrich), der so gewählt wird, dass lokale Abweichungen vom Mittelwert (markiert durch einen Beistrich) nur von genügend kleinskaligen Strukturen des Strömungsfeldes verursacht werden, welche dann als Turbulenz bezeichnet werden sollen und sich bei Anwendung des Mittelungsoperators herausmitteln. Dieser Operator könnte etwa durch Mittelwerte entlang einer bestimmten Flugstrecke (siehe Abb. 14-2) definiert werden und ist dann sowohl von deren Länge als auch vom Verlauf der Strecke abhängig. Angewandt als gleitendes Mittel über eine vorgegebene Weglänge können dann räumliche Korrelationsfunktionen der *i*-ten Windgeschwindigkeitskomponenten entlang der Flugstrecke gebildet und daraus spektrale Varianzdichten  $p_i(\bar{r}, k)$  einer jeden bezüglich der Strecke subskaligen Wellenzahl *k* (Kehrwert der Wellenlänge) abgeleitet werden, die dann dem Ort  $\bar{r}$  im Zentrum der Mittelungsstrecke zugeordnet werden. Entsprechend einem Argument von Kolmogorov kann aber für einen Wellenlängenbereich zwischen einer kleinsten noch nicht durch molekulare Zähigkeit beeinflussten Wellenlänge  $L_m$  und einer noch genügend kleinen maximalen Wellenlänge  $L_p$  angenommen werden, dass diese Varianzdichten neben der Wellenzahl *k* nur noch von der *Eddy Dissipation Rate* (EDR) abhängen, welche die Übergangsrate von makroskopischer kinetischer Strömungsenergie eines Kontinuums in unregelmäßige mikroskopische kinetische Energie der Luftmoleküle darstellt. Da sich dieser Vorgang bei den allerkleinsten noch makroskopischen Längenskalen  $< L_m$  (Kolmogorov-Skalen) abspielt, wird also kinetische Energie, die für Längenskalen  $> L_p$  erzeugt wird, durch den gesamten (sogenannten) Inertialbereich dazwischen „durchgereicht“ (Skalentransfer). Die Dissipationsrate, die demnach als ständige Senke der Geschwindigkeitsvarianzen wirkt, hat dann die Einheit  $m^2s^{-3}$ . Die spektralen Varianzdichten innerhalb des Inertialbereiches müssen sich aus Dimensionsgründen somit gemäß

$$p_i(\bar{r}, k) = \alpha_i \cdot EDR^{\frac{2}{3}}(\bar{r}) \cdot k^{-5/3} \tag{9}$$

darstellen lassen (siehe KOLMOGOROV 1941), wobei  $\alpha_i$  die zugehörige Kolmogorov-Konstante ist. Ferner können für diesen Bereich Isotropieannahmen gemacht werden, gemäß derer die gleiche Dichtefunktion auch bezüglich einer jeden anders orientierten Flugstrecke gilt. Dabei ist  $\alpha_i$  nur davon abhängig, ob die *i*-te Raumrichtung longitudinal oder transversal zur mittleren Strömungsrichtung verläuft. Die Varianz des Vertikalwindes im fliegenden Flugzeug wäre dann im Allgemeinen eine transversale Varianz. Aber auch die spektrale Dichte der TKE  $p_{kin}(\bar{r}, k)$  folgt dann dem gleichen Potenzgesetz mit einer angepassten Kolmogorov-Konstanten  $\alpha_{kin}$ , womit dann gilt:

$$TKE(\bar{r}) = \int_{k_1}^{k_2} p_{kin}(\bar{r}, k) \cdot dk \tag{10}$$

Während die TKE von der räumlichen Skala eines Mittelungsoperators abhängt, ist nun die EDR hiervon unabhängig und wurde wohl auch deshalb gemäß den Vereinbarungen

der ICAO als verbindliches Turbulenzmaß gewählt, etwa im Annex 3 zur Erstellung von Berichten über **signifikante meteorologische Bedingungen für den Flugverkehr** (SIGMET). Darüber hinaus kann die EDR aus Aufzeichnungen der Vertikalbeschleunigung von Flugzeugen abgeleitet werden. Schließlich ist die EDR auch eine Schlüsselgröße für die Turbulenzparametrisierung in NWV-Modellen und kann somit prinzipiell von diesen vorhergesagt werden. Somit erfüllt die EDR tatsächlich alle Bedingungen, die an das gesuchte Turbulenzmaß gestellt wurden. Weil die Annahmen, die zu den Kolmogorov-Spektren führen, auch wesentlicher Bestandteil der Turbulenzparametrisierung sind, soll im Folgenden „Turbulenz“ vor allem auch durch die Gültigkeit dieser klassischen Turbulenzeigenschaften charakterisiert sein.

### 3.4 Das Prinzip der EDR-Messung in Passagierflugzeugen

Die Kunst der flugzeuggestützten EDR-Messung besteht darin, aus den Aufzeichnungen der eingebauten Vertikalbeschleunigungsgeber die spektrale Dichtefunktion der atmosphärischen Vertikalgeschwindigkeitsvarianz abzuleiten und aus diesen dann die EDR zu berechnen (etwa aus dem konstanten Glied bei linearer Regression in doppelt logarithmischer Auftragung der Dichtefunktion). Hierzu muss zunächst angenommen werden, dass es möglich ist, nur den Teil der Registrierungen auszuwerten, der durch Turbulenzstrukturen des Inertialbereiches verursacht wurde. Zur Ableitung des atmosphärischen Spektrums wird das Flugzeug als lineares Übertragungssystem angesehen, welches durch die Vertikalbewegung der Atmosphäre angeregt wird. Die vor allem infolge der Flugzeugmasse gedämpfte Vertikalbewegung des Flugzeuges könnte durch eine wellenzahlabhängige Übertragungsfunktion  $H_{F1}(k)$  des Flugzeugs ausgedrückt werden, welche die Amplituden hoher Wellenzahlen in Bezug auf die vertikale Flugzeugbewegung besonders stark dämpft (rote Kurve in Abb. 14-3). Einfacher ist aber die Bereitstellung einer abgewandelten Übertragungsfunktion  $H_{F1}^{w,2}(k)$ , welche die spektrale Dichten der Vertikalwindvarianz in solche der Vertikalbeschleunigungsvarianz des Flugzeuges überträgt. Mit Hilfe der Annahme, dass die Turbulenzstrukturen quasi „eingefroren“ mit der mittleren Relativgeschwindigkeit  $\bar{v}$  (mittlere TAS) am Flugzeug vorbeiziehen (Taylor-Hypothese), kann für den Übergang von Wellenzahlen auf Frequenzen die Beziehung  $f = k \cdot \bar{v}$  benutzt werden, und man erhält aus der spektralen Zerlegung der registrierten und bandpassgefilterten Vertikalbeschleunigungsvarianz  $\sigma_z^2$  folgende Gleichung für die EDR:

$$EDR \approx \frac{(\sigma_z \tau_{F1})^3}{\bar{v} \tau_{F1}(f_1, f_2)} \tag{11}$$

Dabei ist  $\tau_{F1}$  die vom Flugzeug und den Flugbedingungen abhängigen Zeitkonstante aus Abschnitt 3.2 und

$$\tau_{F1}^{-2/3}(f_1, f_2) = \int_{f_1}^{f_2} \alpha_{33} \cdot \left| \tau_{F1} \cdot H_{F1}^{w,2}\left(\frac{f}{\bar{v}}\right) \right|^2 f^{-5/3} \cdot df \tag{12}$$

ist das verbleibende Integral der Dichtefunktion, so dass  $\tau_{FL}$  also ein integrales Zeitmaß darstellt, in dem  $\alpha_{33}$  die Kolmogorov-Konstante für die transversale Varianz der vertikalen Windgeschwindigkeit ( $w = v_3$ ) ist. Die Grenzfrequenzen  $f_1$  und  $f_2$  sind so gewählt, dass die zugehörigen Wellenlängen innerhalb des Inertialbereiches liegen und die Messung weder durch Deformationsschwingungen (bei kleinen Wellenlängen) noch durch ausgleichende Flugmanöver (bei großen Wellenlängen) allzu stark gestört wird. Zu kleinen Schwingungsfrequenzen hin wird überdies die Empfindlichkeit der Messung wegen der Trägheit des Flugzeuges immer schlechter. Vor der Varianzbildung müssen die Zeitreihen der Vertikalbeschleunigung daher entsprechend bandpassgefiltert werden, um dann schließlich die EDR zu berechnen. Offensichtlich gilt aber gemäß Abschnitt 3.2:  $H_{F1}^{w,z} \approx \tau_{F1}^{-1}$ , so dass die Längenskala  $\bar{v} \cdot \tau_{F1}$  im Wesentlichen nur noch von den eingrenzenden Wellenzahlen abhängt, und somit also der „Eddy Dissipation-Parameter“  $EDP := EDR^{1/3}$  nahezu proportional zu DEVG ist. Diese enge Beziehung zur DEVG hat wohl vor allem dazu geführt, dass nicht die EDR, sondern ihre dritte Wurzel (mit Einheit  $m^{2/3} \cdot s^{-1}$ ) als Turbulenzmaß gewählt wurde. Missverständlicher Weise wird aber dieses Maß in der Flugmeteorologie im Allgemeinen ebenfalls als EDR bezeichnet.

Es mag nun sein, dass auch bei der Bestimmung der EDP das Zeitmaß  $\tau_{F1}$  (ausgedrückt mit Hilfe der CAS) ähnliche systematische Fehler aufweisen kann wie bei der Ableitung der DEVG (siehe Abschnitt 3.2). Dies müsste aber beim Vergleich mit Modelldaten korrigiert werden (siehe Abschnitt 5). Zurzeit sind nur nordamerikanische Kontinentalflugzeuge mit einer geeigneten Software zur Bestimmung des EDP ausgestattet, die beim NCAR entwickelt wurde. In der Regel werden dabei Zeitreihen der Vertikalbeschleunigung in einer Länge von etwa 10 Sekunden mit einer Abtastfrequenz von 4 oder 8 Hz aufgenommen und spektral ausgewertet. Bei einer Fluggeschwindigkeit von etwa 700 km/h liegt damit die maximal erfasste Wellenlänge bei etwa 19,4 km

und die kleinste erfasste Wellenlänge ist nicht kleiner als etwa 490 m, um Deformationsschwingungen des Flugzeuges auszuschließen. Die Meldungen stehen als Zusatz im amerikanischen „Aircraft Communications Addressing and Reporting System“ (ACARS) zur Verfügung.

**4 Methode zur Vorhersage des EDP**

Das neue beim DWD benutzte Verfahren zur Turbulenzvorhersage beruht nun auf der Berechnung des EDP mit Hilfe des vorhandenen Turbulenzschemas im COSMO-Modell. Weil dieses aber, wie alle klassischen Turbulenzmodelle, gerade jene Prozesse nicht beschreiben konnte, die besonders mit dem Auftreten von CAT oder CIT verbunden sind, musste zunächst eine grundlegende Erweiterung entwickelt werden.

**4.1 Das skalenseparierte Turbulenzschema im COSMO-Modell**

Es wurde angestrebt, für die EDP-Vorhersage - soweit wie möglich - die deterministische Vorhersage der EDR zu verwenden, da diese Größe bereits eine Schlüsselrolle im Turbulenzschema spielt. Es soll daher kurz auf die Besonderheiten der Turbulenzparametrisierung eingegangen werden:

**4.1.1 Das allgemeine Wesen des Turbulenzschemas**

Das Turbulenzschema eines NWV-Modells ist zunächst einmal ein Bestandteil der Subskalenparametrisierung. Dies ist eine Komponente des Modells, die allein deshalb nötig ist, weil die Anwendung räumlicher Differentiationsoperatoren (die in den numerisch zu lösenden Modellgleichungen enthalten sind) in einem diskreten numerischen Gitter automatisch mit der Ausführung eines Mittelungsoperators verbunden ist, welcher SGS-Variabilität der Variablenfelder (also deren Schwankungen innerhalb der Gitterzellen) in den so erhaltenen diskretisierten Gleichungen herausfiltert. Dieser Filter könnte etwa mit der in Abschnitt 3.3 eingeführten gleitenden Mittelung längs einer Flugstrecke identifiziert werden, wobei jetzt aber die Mittelungslänge durch den horizontalen Gitterabstand gegeben ist, so dass nicht nur turbulente Schwankungen herausgemittelt werden! Auf Grund nichtlinearer Terme in den Modellgleichungen erzeugt aber der Filter statistische Momente, welche die Auswirkungen der SGS Variabilität auf die Entwicklung der vom Gitter aufgelösten (skaligen) Variablenfelder beschreiben. Durch das Turbu-

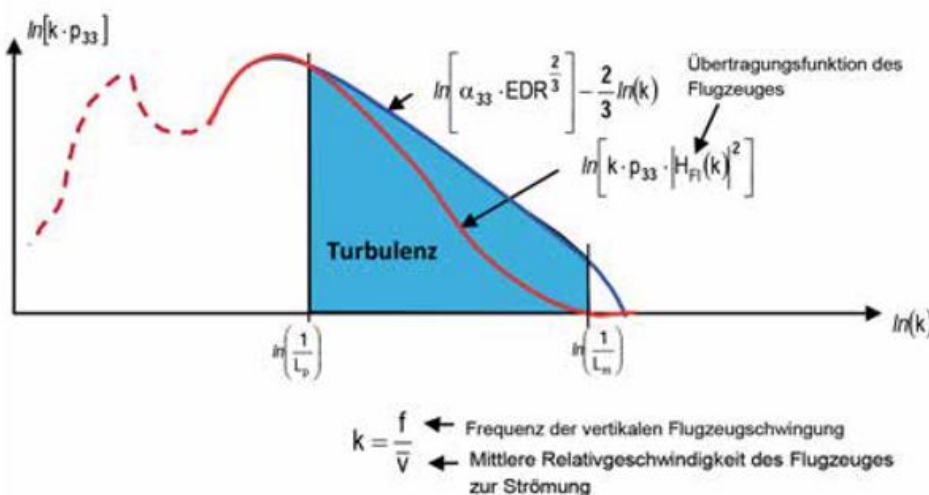


Abb. 14-3: Prinzipieller Verlauf der spektralen Varianzdichte  $p_{33}$  des Vertikalwindes (blau) als Funktion der longitudinalen Wellenzahl (längs der Flugrichtung) in doppeltlogarithmischer Auftragung: Nur im hellblau markierten turbulenten Bereich zwischen den Wellenlängen  $L_m$  und  $L_p$  gilt das Kolmogorovsche Potenzgesetz und die Kurve verläuft linear. Die rote Kurve veranschaulicht die spektrale Varianzdichte der mit der Übertragungsfunktion  $H_{F1}$  gedämpften Vertikalbewegung des Flugzeuges.

lenzschema durch das Turbu-

lenzschema des COSMO-Modells (RASCHENDORFER 2001) wird nun versucht, den in Verbindung mit Turbulenz stehenden Anteil dieser statistischen Momente als Funktionen der skaligen Variablenfelder zu beschreiben, in dem die bereits im Abschnitt 3.4 erwähnten klassischen Turbulenzeigenschaften in Verbindung mit Bilanzgleichungen für diese Momente benutzt werden. Eine Schlüsselrolle spielt dabei eine prognostische Gleichung für die TKE (siehe Abb. 14-4), gemäß der die zeitliche Tendenz der TKE durch Transport- und Quellterme bestimmt wird.

Letztere sind zunächst einmal die positiv definite Scherproduktion und der Auftriebsterm, der allerdings bei stabiler thermischer Schichtung ein Senkenterm ist. Ein ständiger Senkenterm ist dagegen die EDR, die im Rahmen des Turbulenzmodells im Einklang mit dem Kolmogorov-Spektrum der TKE (siehe Abschnitt 3.4) durch

$$EDR = \frac{(2 TKE)^{3/2}}{\alpha_{EDR} \ell}$$

ausgedrückt werden kann. Dabei ist  $\alpha_{EDR}$  eine Modellkonstante und  $\ell$  stellt die turbulente Längenskala dar, die durch Integration der spektralen Dichtefunktionen der besagten Momente über den turbulenten Teil des Spektrums darstellbar ist. Dies ist der Anteil des Spektrums, der im Einklang mit den benutzten Turbulenzeigenschaften ist und ist durch die maximale, isotrope, turbulente Wellenlänge  $L_p$  (siehe ebenfalls Abschnitt 3.3) nach oben beschränkt. Diese zu  $\ell$  proportionale Längenskala repräsentiert die größten isotropen Scherwirbel und wird durch eine monoton wachsende Funktion des Erdbodenabstandes beschrieben, die in der unteren Grenzschicht nahezu linear verläuft und nach oben hin einer maximalen turbulenten Längenskala zustrebt

(Blackadar-Profil). Nicht nur hiermit entspricht das Turbulenzschema im COSMO-Modell in seinen Grundzügen dem recht verbreiteten Schließungsschema nach MELLOR und YAMADA (1982) auf dem Niveau 2,5 der von den Autoren gewählten Anisotropieskala.

#### 4.1.2 Besonderheiten des Turbulenzschemas zum Zwecke der EDR-Vorhersage

Das derzeitige Turbulenzschema enthält aber eine Reihe wichtiger Erweiterungen. Hierzu gehört vor allem auch seine Einbettung in das erweiterte Konzept der Skalentrennung. Hierdurch wird erstmals das Vorhandensein größerskaliger, nicht-turbulenter Strömungsmuster auf die turbulenten Schließungsgleichungen berücksichtigt, indem die durch diese SGS Strömungen verursachte Scherproduktion von Turbulenz im Skalenbereich zwischen einer horizontalen Separationsskala  $L_H \approx L_p$  und der horizontalen Skala  $D_H$  (die der horizontalen numerische Gitterauflösung angepasst ist) berücksichtigt wird. Dies geschieht formal durch die Betrachtung spektral separierter, hochpassgefilterter Gleichungen allein für die turbulenten statistischen Momente, wobei sich automatisch entsprechende zusätzliche Quellterme (Skalentransferterme) in der so „separierten“ TKE-Gleichung ergeben. Diese stellen den Transfer von SGS Kinetischer Energie (SKE) aus dem Reservoir der nicht-turbulenten (SGS) kinetischen Zirkulationsenergie (*Circulation Kinetic Energy* CKE) in den turbulenten Skalenbereich dar (siehe Abb. 14-4 und 14-5).

Dieses Konzept ist im Laufe der vergangenen Jahre entwickelt worden und ist bislang noch nicht in Gänze veröffentlicht. Einige Aspekte hierzu finden sich aber bereits in

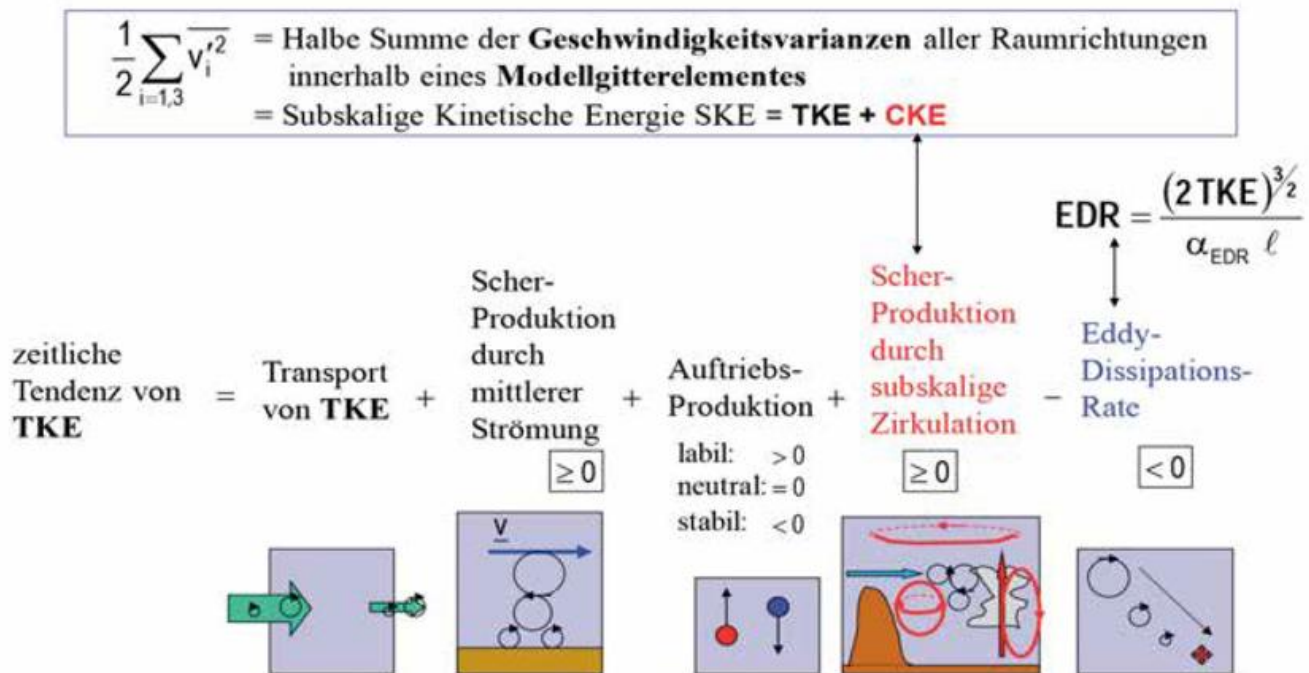


Abb. 14-4: EDR und TKE im numerischen Wettervorhersagemodell. Die EDR ist der maßgebliche Senkenterm in der prognostischen TKE-Gleichung, und Scherung ist der maßgebliche Quellterm. Dieser wird zum einen durch die skalige (mittlere) Strömung erzeugt. Hinzu kommt aber noch die Scherproduktion durch nicht turbulente, SGS-Zirkulationen, die nur in der „separierten“ (siehe Abschnitt 4.1.2) TKE-Gleichung auftaucht und sich aus dem Reservoir CKE der kinetischen Energie der nichtturbulenten SGS-Zirkulation speist.

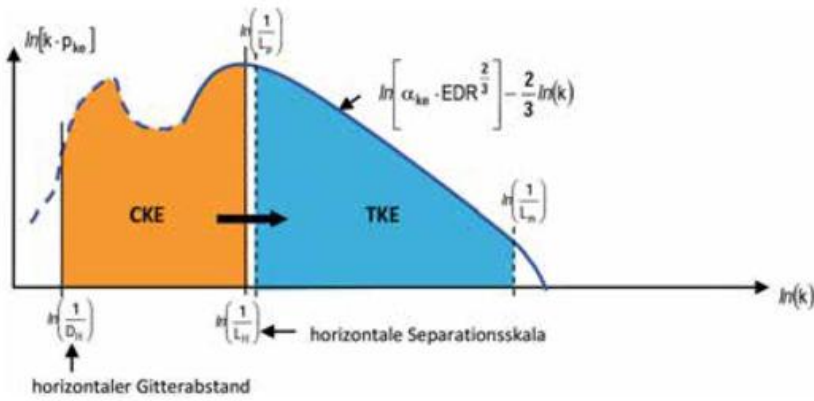


Abb. 14-5: Schematisches Spektrum der SGS Kinetischen Energie (SKE), die sich in einen Anteil durch Turbulenz (TKE) und einen durch nicht turbulente Zirkulationen (CKE) aufteilt. Letzterer speist die TKE durch einen Skalentransfer kinetischer Energie.

der Literatur (etwa BALDAUF et al., RASCHENDORFER 2011, im Abschnitt über die Turbulenzparametrisierung des COSMO-Modells). Dennoch werden bereits im operationalen Modell die für die CAT-Prognose entscheidenden zusätzlichen TKE-Quellterme berechnet.

**4.1.3 Wirkungsweise zusätzlicher Skalentransferterme für die TKE**

Allein durch Vergleiche von Modellläufen mit und ohne Berücksichtigung der Skalentransferterme werden aber

die Defizite einer EDP-Simulation erkennbar, die auf einer klassischen Turbulenzparametrisierung fußt. Augenscheinlich kann ein solches Schema oberhalb der Grenzschicht praktisch durchgängig höchstens schwache Turbulenz vorhersagen (siehe Abb. 14-6, oben links: Referenz).

Insbesondere die erwarteten Turbulenzgebiete bei hoher konvektiver Aktivität und in der Nähe der horizontalen Scherungsgebiete entlang von Frontalzonen oder im Bereich des Strahlstroms zeichneten sich vor allem oberhalb der Grenzschicht nicht ab. Auch die be-

kannten Turbulenzgebiete oberhalb stark gegliederter Topographie sind nicht ausreichend entwickelt, so dass im Prinzip gerade die Phänomene CAT und insbesondere auch CIT mit dem Referenzschema kaum wiedergegeben werden. Durch die Einführung von Skalentransfertermen können nun die wesentlichen fehlenden Mechanismen der Turbulenzerzeugung abgebildet werden. Sie entsprechen der TKE-Erzeugung durch die folgenden drei SGS Strömungsstrukturen: Dies sind zum Einen die SGS Horizontale Scherwirbel (SHS), deren Wirkung über die Horizontalscherung des horizontalen Windfeldes

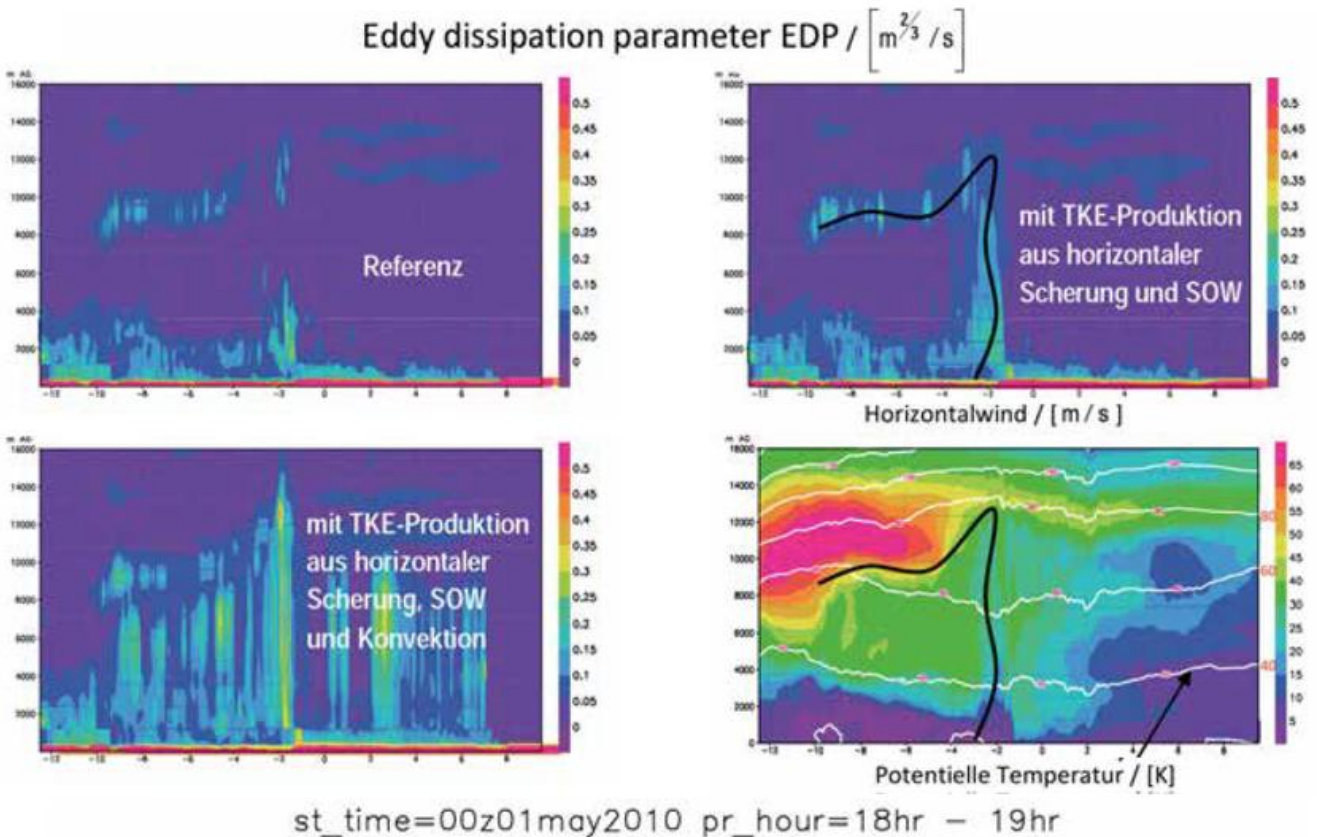


Abb. 14-6: Höhengschnitte entlang einer Breitenlinie aus Testläufen mit COSMO für den 01.05.2010 (Start 00 UTC, Mittelwerte über die 19-te Vorhersagestunde). Die Höhengskala reicht jeweils von 0 bis 16 000 m. Als Abszisse sind Längengrade des mit seinem Ursprung ins Zentrum des Modellgebietes gedrehten geographischen Koordinatensystems dargestellt. Das untere rechte Bild stellt die horizontale Windstärke (aus der Referenzversion ohne Zusatzterme) dar, und man erkennt den durchschnittlichen Strahlstrom mit zugehöriger Frontalzone (schwarze Linie). Die anderen Schnitte stellen den EDP dar, wobei unterschiedliche Zusatzquellen der TKE, etwa die durch Nachlaufwirbel an SGS Orographie und brechende Schwerewellen (SOW), eingeschaltet waren.

berechnet wird. Ferner werden auch Nachlaufwirbel an SGS Orographie sowie durch brechende Schwerewellen (SOW) berücksichtigt. Hierzu werden Ausgaben des im COSMO-Modell vorhandenen Schemas zur Berechnung der Impulssinken durch die Wirkung SGS-Orographie (siehe SSO-Schema gemäß LOTT und MILLER 1997) benutzt. Schließlich gehen auch SGS Konvektive Vertikalwinde (SKV) ein, wozu die Produktion an konvektiver kinetischer Energie aus dem vorhandenen Konvektionschema (siehe etwa DOMS et al. 2011) verwendet wird. Dabei ist der letztgenannte Term besonders für die Beschreibung von CIT von Bedeutung.

Abb. 14-6 zeigt Höhenschnitte des abgeleiteten EDP (gemäß der angegebenen Farbskala) längs einer konstanten Breitenlinie für einen COSMO-Lauf vom 01.05.2010 quer durch eine Frontalzone, die als schwarze Linie angedeutet ist. Im unteren rechten Bild ist zur Orientierung der Betrag des Horizontalwindes zusammen mit Isolinien der potentiellen Temperatur (Isentropen) dargestellt; und man erkennt allein schon daran recht gut die Scherungsbereiche in Verbindung mit der Frontalzone und dem geschnittenen Strahlstrom. Im Bereich der mittleren Stratosphäre zeichnet sich zwischen etwa  $-8^\circ$  und  $+8^\circ$  (im Bezug auf das gedrehte Koordinatensystem des COSMO-Modells) anhand der Spreizung der Isentropen auch eine relative Labilisierung der thermischen Schichtung ab.

Das obere linke Bild zeigt den EDP bezüglich der Referenzversion (ohne die drei zusätzlichen Skalentransferterme) und bildet bereits die Bereiche mit Grenzschichtturbulenz und vertikaler Scherung durch den Strahlstrom ab. Im Bild daneben ist das Ergebnis mit eingeschalteter TKE-Produktion durch SOW und SHS dargestellt, wodurch sich nun vor allem die Frontalzone über die gesamte Troposphäre hinweg abzeichnet. Unten links wurde schließlich auch die TKE-Produktion durch SKV berücksichtigt, wodurch nun auch die konvektive Aktivität (die bei diesem Fall recht hoch war) quer durch die Troposphäre in den EDP-Werten abgebildet wird. Somit kann also mit dem so erweiterten Turbulenzschema insbesondere auch CIT prinzipiell simuliert werden. Es sei bemerkt, dass sich der horizontale Scherterm durch

$$SHS = q_{SHS} L_{SHS} \cdot \left( HDF^2 - \frac{1}{2} \frac{q_{SHS}}{L_{SHS}} HDV \right) \quad (13)$$

darstellen lässt, und damit eine gewisse Verwandtschaft mit dem Ellrod-Index (ELD) besitzt (siehe Abschnitt 2). Die Vertikalscherung (die bereits zur klassischen Scherproduktion der TKE beiträgt) taucht in SHS allerdings nicht auf, dafür aber die Längen- und auch die Geschwindigkeitskala der SGS Horizontalwirbel  $L_{SHS}$  und  $q_{SHS}$ , wobei sich  $q_{SHS}$  wiederum als Funktion von HDF und HDV ausdrücken lässt. Bei Berücksichtigung von Kopplungen mit nicht-turbulenten SGS-Wirbeln, die durch die Vertikalscherung VSH des Horizontalwindes angetrieben werden, ist jedoch  $q_{SHS}$  auch noch von VSH abhängig, womit die Ähnlichkeit mit ELD noch größer wird. Diese Kopplung wurde bislang aber nicht berücksichtigt.

## 4.2 Das statistische Anschlussverfahren

Um den letztlich immer verbleibenden Unzulänglichkeiten der Turbulenzparametrisierung und des gesamten Modellsystems, sowie auch den möglichen systematische Abweichungen der gemessenen EDP vom tatsächlichen atmosphärischen Wert (siehe Abschnitte 3.2 und 3.4) zu begegnen, sind allerdings noch statistische Korrekturen vorgesehen. Im Zuge dieser Korrekturen werden im Rahmen einer Regressionsbeziehung neben dem berechneten EDP noch weitere Prädiktoren berücksichtigt, um so gemessene EDP-Werte besser abzubilden. Die hierzu nötigen Berechnungen werden mit dem eigens entwickelten Programmpaket T MOS (*Turbulence Model Output Statistics*) ausgeführt, das eine stark an das MOS-Verfahren des DWD (KNÜPFER 1996) angelehnte lineare Polynomregression von einem vorzugebenden Grad  $n-1$  enthält. Mit deren Hilfe werden dann optimale Koeffizientenwerte  $k_j$  zu den  $n$  Potenzen des jeweiligen Prädiktors gefunden, so dass die Abweichungsquadrate zwischen den Datenreihen eines sukzessive berechneten Residualprädiktanden, und der Regressionsfunktion eines Prädiktors minimiert werden. Werden insgesamt  $p$  Prädiktoren  $PT_k$  berücksichtigt, so werden letztlich die Datenreihen des gemessenen EDP durch die kumulative Regressionsfunktion

$$Reg_{n,p}(PT) := c_0 + \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^{n-1} c_{jk} \cdot (PT_k)^j$$

angenähert. Bei rein linearer Regression ist  $n = 2$  und man erhält die folgende Linearkombination:

$$Reg_{2,p}(PT) := c_0 + \sum_{k=1}^p c_k \cdot PT_k$$

Zwecks Ermittlung der Regressionskoeffizienten und für Testzwecke kann das COSMO-Modell (in vergleichbarer Auflösung und Gebietsgröße wie COSMO-EU) über den Osten der USA verschoben werden (COSMO-US), um die bislang nur dort vorliegenden EDP-Messdaten zu verwenden.

## 5 Verifikation und Diskussion sowie weitere Ausblicke

Für die Turbulenzvorhersage werden durch das NWV-Modell zurzeit all die Informationen bereit gestellt, die nötig sind, sowohl die resultierende EDR, als auch die drei bislang nicht berücksichtigten Skalentransferterme (SOW, SHS und SKV, siehe Abschnitt 4.1.3) selbst, sowie eine Reihe weiterer Turbulenzindizes als mögliche Prädiktoren für das Regressionsverfahren zu bestimmen. Dazu gehören auch solche Modellgrößen, die mit möglichen Messartefakten in Verbindung stehen (etwa die Luftdichte). In einer ersten Studie wurde nun die Verbesserung der EDP-Vorhersage durch die bisherigen Maßnahmen quantifiziert, indem die über 6 Millionen EDP-Messungen  $EDP_{mes}$ , die für das Winterhalbjahr Oktober 2010 bis März 2011 über dem COSMO-US-Gebiet zur Verfügung standen, mit folgenden Vorhersagegrößen verglichen wurden:

- I:  $EDP_I = EDR_0^{1/3}$  (mit  $EDP_0$  aus dem bisherigen Turbulenzschema),
- II:  $EDP_{II} = (EDR_0 + SOW + SHS + SKV)^{1/3}$   
(mit zusätzlichen TKE-Quellen gemäß Abschnitt 4.1.3),
- III:  $EDP_{III} = c_0 + c_1 \cdot COR \cdot EDP_{II}$  (lineare Regression mit dem Prädiktor  $COR \cdot EDP_{II}$ ),
- IV:  $EDP_{IV} = c_0 + c_{1_1} \cdot COR + c_{1_2} \cdot COR \cdot EDP_{II}$   
(wie III, aber mit COR als zusätzlichen Prädiktor).

Dabei ist  $COR := \sqrt{\frac{\rho V}{\rho_0 V_0}}$  der reziproke Korrekturfaktor

bezüglich des Massenflusses (siehe Abschnitte 3.2 und 3.4). Die Variante IV lässt gemäß

$$\frac{EDP_{mes} - c_0}{COR} = c_{1_1} + c_{1_2} \cdot EDP_{II}$$

alle Freiheitsgrade wegen einer möglicherweise fehlenden Massenflusskorrektur der Messwerte im Rahmen einer linearen Regression zu. Dabei ist  $c_{1_2}$  ein verbleibender Skalierungsfaktor, und  $c_0$  mag einen systematischen Fehler der reinen Flugzeugmessungen ( $EDP_{mes}$ ) berücksichtigen. Ganz ähnlich kann  $c_{1_1}$  für einen Offset der Modellvorhersage (hier  $EDP_{II}$ ) stehen, der in Variante III aber unberücksichtigt bleibt.

Wie in vergleichbaren Studien (etwa ABERNETHY 2008) lag ein äußerst starkes Übergewicht von Ereignissen mit keiner oder nur schwacher Turbulenz in den Messdaten vor, weswegen die Datensätze statistisch vorbehandelt werden mussten, worauf hier aber nicht eingegangen werden kann. Auch das benutzte Verifikationsverfahren zur Beurteilung der vier untersuchten Varianten orientiert sich stark an den Kenngrößen, die bei vergleichbaren Studien verwendet

wurden. Sie entstammen der Beurteilung der kategorischen Vorhersage, ob zumindest mäßige (*Moderate Or Greater*) Turbulenz (MOG) vorliegt (JA) oder nicht (NEIN). Während der BIAS das Zahlenverhältnis der vorhergesagten JA-Ereignisse zu den eingetretenen JA-Ereignissen ( $>1$ : überschätzt;  $<1$ : unterschätzt) darstellt, zeigt die *Probability Of Detection: Yes* (PODY) das Zahlenverhältnis der richtig vorhergesagten JA-Ereignisse zu den eingetretenen JA-Ereignissen an, und die *Probability Of Detection: No* (PODN) das Gleiche für die NEIN-Ereignisse (beide Werte zwischen -1 und 1; 1: optimal). Beide Größen können gemäß  $TSS = PODY + PODN - 1$  zur *True Skill Statistics* (TSS) kombiniert werden. Diese Größen können mit Hilfe der Grenzwertoptimierungskurve, der so genannten „Receiver Operating Characteristic“ (ROC), ermittelt werden, welche eine recht kompakte Ausdrucksform für die Vorhersageleistung ist. Sie wird aus den (PODY, PODN)-Paaren ermittelt, die sich ergeben, wenn die Trennung zwischen JA- und NEIN-Ereignissen variiert wird. Dabei findet man nicht nur das optimale Wertepaar aus PODY und PODN; die Fläche unter der Kurve (*Area Under the Curve*, AUC) ist auch ein weiteres Gütemaß. Anhand der ROC-Kurven und der zugehörigen optimalen (PODY, PODN)-Paare und TSS-Werte in der zugehörigen Tabelle (beides in Abb. 14-7) dokumentiert sich nun recht anschaulich der Fortschritt, der sowohl durch die Weiterentwicklung des Turbulenzschemas als auch durch die angebrachten Korrekturen und schließlich auch durch Anwendung des Regressionsverfahrens im Hinblick auf eine optimierte EDP-Vorhersage bislang erzielt wurde.

Das *Turbulence Joint Safety Implementation Team* (TJSIT), bestehend aus der *Federal Aviation Administration* (FAA) und der NASA zusammen mit verschiedenen Forschungsinstituten und Fluggesellschaften der USA, hat nun Mindeststandards zur Turbulenzprognose festgelegt. Demnach sollte möglichst  $PODY > 0,8$  und  $PODN > 0,85$  erreicht werden (KUHL 2006). Die angestrebten Werte der Gütemaße konnten allerdings bislang weder in unse-

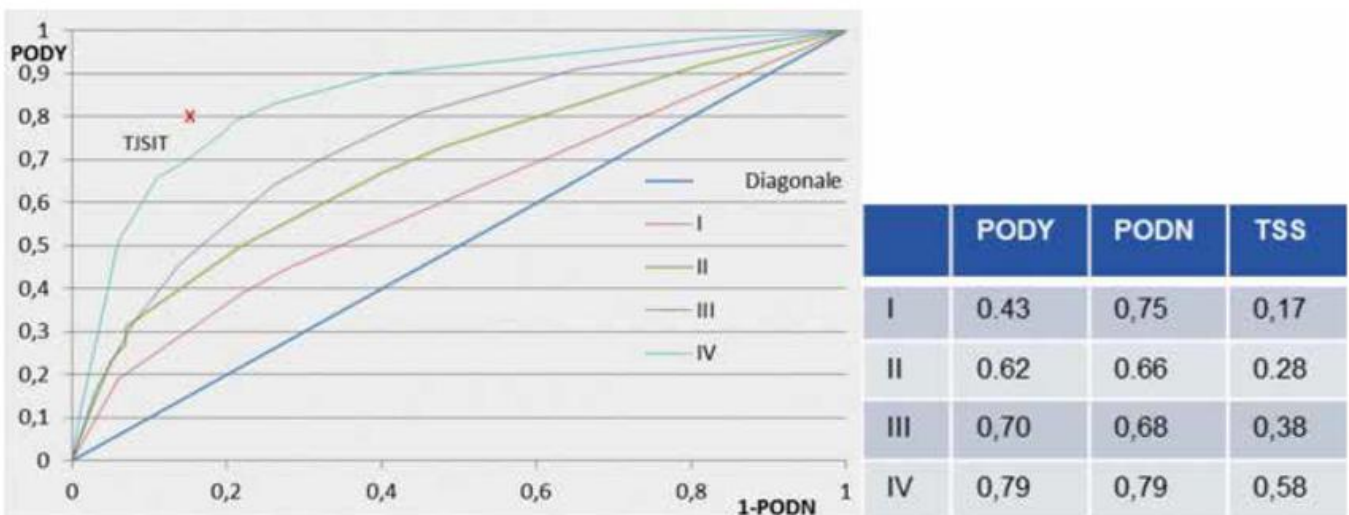


Abb. 14-7: ROC-Kurven von vier sukzessive verbesserten Prognosegrößen für den von Flugzeugen gemessenen EDP und Tabelle mit zugehörigen optimalen Gütemaßen (I, II, III, IV wie im Text). Datengrundlage ist das Winterhalbjahr 2010/2011 mit 4241 399 EDP-Registrierungen oberhalb FL210. Das rote Kreuz markiert die von TJSIT geforderte Vorhersagegüte.

rer Studie noch in anderen bekannten Studien vollständig erreicht werden. So werden auch für das GTG des NCAR optimale TSS-Werte zwischen 0,5 und 0,6 angegeben (ABERNETHY 2008). Es soll auch hervorgehoben werden, dass keiner der anderen typischen Turbulenzindizes (und auch keine durch die Regression mögliche Kombination aus diesen) eine bessere Vorhersage ermöglicht, als bereits die Variante I.

Der Vorteil der Variante IV gegenüber III zeigt allerdings an, dass noch eine dichte- und geschwindigkeitsabhängige, systematische Diskrepanz zwischen (korrigierter) EDP-Messung und Prognose vorliegt, die noch weiter untersucht werden sollte: Der gesamte nicht an Turbulenzindikatoren gebundene Beitrag bei Variante IV ist durch  $c_0 + c_1 \cdot \text{COR}$  gegeben und folgt damit quasi einem Höhenprofil. Mit den ermittelten Koeffizientenwerten ( $c_0 \approx -0,34$  und  $c_1 \approx 0,71$ ) wird angezeigt, dass diese Korrektur in mittleren Flughöhen (oberhalb FL210) nahezu verschwindet, aber nach unten hin positiv und nach oben hin negativ wird. Dies könnte etwa damit erklärt werden, dass in niedrigeren Flughöhen die Wahrscheinlichkeit für nicht korrigierte Anstellwinkel oder Flugmanöver (siehe Abschnitt 3.2) zunimmt. Diese Erklärung wurde durch getrennte Auswertung der wenigen vorliegenden EDP-Messungen gestützt, die nicht auf Registrierungen der Vertikalbeschleunigung basieren sondern auf direkteren Messungen des Vertikalwindes (siehe Ende Abschnitt 3.2). Diese zeigten nämlich kaum einen Vorteil durch die Varianten III und IV. Allerdings kann auch das in niedrigen Flughöhen verstärkte Auftreten von Nachlaufturbulenz durch voraus fliegende Flugzeuge beziehungsweise das in größeren Flughöhen eher mögliche systematische Vermeiden typischer Turbulenzgebiete (etwa weil sie vom Piloten erkennbar sind oder vor dem Durchflug gewarnt wurde) einen Teil der beobachteten Diskrepanz erklären. Schließlich sind auch verschiedene noch bestehende systematische Modellfehler in Erwägung zu ziehen. So wird im Turbulenzschema (vornehmlich zur Stabilisierung des numerischen Verfahrens) eine künstliche Hintergrundturbulenz aufprägt, die tendenziell dann zu einer Überschätzung der EDP-Prognose führt, wenn die Werte ohnehin klein sind (was verbreitet in großen Flughöhen der Fall ist). Andererseits können Turbulenzfelder, die mit der mittleren Strömung wandern und stromab der Quellgebiete noch wirken, wegen des Fehlens von TKE-Advektion im COSMO-Modell bislang nicht erfasst werden. Auch die Berücksichtigung der Scherung des skaligen Vertikalwindes in der TKE-Gleichung wurde noch nicht ausreichend untersucht. Natürlich fehlt unter Umständen auch eine angepasste Behandlung von SGS-Schwerewellen, die im Flugzeug registriert und als Turbulenz interpretiert werden, obwohl sie (im Modell) aber erst beim Brechen mit der (SGS-) Strömung wechselwirken. Auch wird die horizontale Ausbreitung von Schwerewellen im vorhandenen SSO-Schema nicht berücksichtigt. Ferner könnte bereits ein Teil der bei den Messungen wirksamen atmosphärischen kinetischen Energieproduktion bereits vom Modell aufgelöst sein, ohne (etwa wegen fehlender 3D-Scherungsterme) in SKE überzugehen, und somit in der Simulation fehlen.

Einige der erwähnten Defizite werden möglicherweise durch eine vielversprechende Methode von Knox, McCann und Williams (MCCANN et al. 2012) aufgegriffen, die ebenfalls auf einer Ableitung der EDR aus einer TKE-Bilanz gründet. In ihrem Ansatz wird die EDR lediglich durch Vertikalscherung und Auftrieb bilanziert. Die beiden Produktionsterme können aber durch die Wirkung von Schwerewellen modifiziert werden. Die hierzu benötigte Wellenamplitude wird dabei mit Hilfe der Lighthill-Ford-Gleichung für die Produktion von Schwerewellenstrahlen aus Wirbelstraßen ausgedrückt und ist damit nicht nur eine Funktion vom Horizontalwind, sowie dessen Wirbelstärke und Divergenz, sondern hängt auch von den Gradienten der beiden genannten Skalarfelder und der zeitlichen Änderungsrate von Windscherungskomponenten ab. Hierdurch konnte die Vorhersagegüte merklich gesteigert werden. Es gilt unter anderem auch zu prüfen, inwieweit solche und ähnlicher Erweiterungen in das entwickelte Verfahren integriert werden können.

## 6 Graphische Umsetzung

Nachdem einige Turbulenzindizes in den Produktkatalog der meteorologischen Workstation beim DWD (NinJo) aufgenommen wurden, ist deren Erscheinungsbild bislang noch frei konfigurierbar. In Zukunft sollen dann besonders geeignete Darstellungsformen vorgegeben werden, die insbesondere auch eine 3D-Lokalisierung von Turbulenzgebieten erlaubt. An Hand der Wetterlage vom 14.02.2013, 06 UTC (Turbulenz im Bereich einer starken Richtungs-scherung zwischen FL 180 und FL 240 entlang des 10. Längengrades über Mitteleuropa; mehrere Flugzeuge meldeten mäßige bis starke Turbulenz, zum Beispiel im Raum Würzburg) sollen zwei Darstellungsbeispiele gegeben werden: Obwohl der erwähnte Ellrod-Index (ELD, siehe Abschnitt 2) in der Auswertung mit TMOS nicht einmal unter den 10 besten Prädiktoren rangiert, wurde neben dem optimierten EDP trotzdem auch der ELD als weiter Turbulenzindex ausgewählt, da er im gegenwärtigen internationalen Flug-

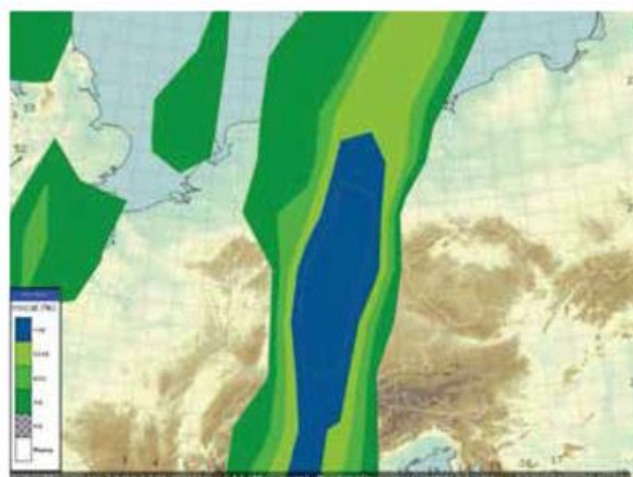


Abb. 14-8: WAFK-Produkt mit Darstellung des aus dem Ellrod-Index bestimmten Turbulenzpotentials (in %) auf der 400 hPa-Fläche (etwa FL230), gültig für den 14.02.2013 um 06 UTC.

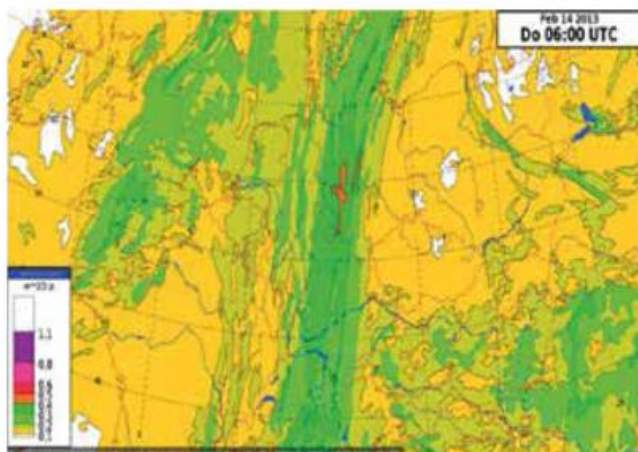


Abb. 14-9: Höchstwerte des mit COSMO-EU berechneten EDP (in  $\text{m}^2\text{s}^{-3}$ ) zwischen den Modellschichten 19 und 10 (etwa FL 180 und FL 360), gültig für den 14.02.2013 um 06 UTC.

wetterdienst von großer Bedeutung ist. So wird von den beiden *World Area Forecast Centres* (WAFc) London und Washington ein maximales Turbulenzpotential in Prozentwerten ausgegeben (siehe Abb. 14-8), das im Wesentlichen unter Nutzung des ELD gebildet wird. Entsprechende Karten sind schon länger für die Vorhersageroutine im DWD über NinJo verfügbar. Diese enthalten allerdings nur einige auf Druckflächen interpolierte Prognosewerte, die aus Maximalwerten der Vorhersagen beider WAFcs auf einem  $100 \times 100 \text{ km}^2$ -Raster gebildet werden, weswegen eine räumlich nur recht grob aufgelöste breite Scherungszone mit mäßiger Turbulenz sichtbar ist.

Zur besseren 3D-Zuordnung können mit den aus COSMO-EU abgeleiteten Indizes auch Maximalwerte über vorgegebene Höhenintervalle dargestellt werden. In Abb. 14-9 sind etwa maximale EDP-Werte zwischen den Modellschichten 19 und 10 (etwa FL 180 bis 360) dargestellt. Nicht nur wegen der höher aufgelösten Eingangsdaten zeigt der EDP deutlich mehr Strukturen als der lediglich über Windscherung definierte ELD. EDP lässt aber bei diesem durch Scherung dominierten Fall mit Werten größer als  $0,35 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$  ebenfalls auf mäßige Turbulenz schließen, insbesondere dort (roter Bereich), wo dies für diesen Fall auch gemeldet wurde. Eine weitere Möglichkeit sind 3D-Animationen von Gebieten, in denen ein bestimmter Schwellenwert überstiegen wird. Der praktische Nutzen solcher „Turbulenzwolken“, muss sich aber noch erweisen.

## 7 Resümee

In den letzten Jahren sind bei den Bemühungen, atmosphärische Turbulenz einerseits in Passagierflugzeugen zu messen und andererseits durch modellgestützte Verfahren vorherzusagen, merkliche Fortschritte gemacht worden. Beim DWD konnten auf Grund der Weiterentwicklungen des Turbulenzschemas im COSMO-Modell im Rahmen des Konzeptes der Skalentrennung zusätzliche Quellterme in die vorhandene prognostische TKE-Gleichung aufgenommen werden. Auf der Grundlage der hiermit

modellierten EDR und gleichzeitiger Nutzung eines eigens entwickelten Regressionsverfahrens (TMOS) ist es möglich, einen optimalen dreidimensionalen Turbulenzindex im GRIB-Format (EDP) aus Modellausgabegrößen abzuleiten, dessen Bestimmung unmittelbar mit der physikalischen Beschreibung der Turbulenz verbunden ist und der damit die bestmögliche von Passagierflugzeugen gemessene (und weitestgehend vom Flugzeug und dessen Manövern unabhängige) Messgröße von atmosphärischer Turbulenz (insbesondere auch CAT) darstellt. Anhand einer ersten Verifikation mittels ROC-Kurven wird deutlich, dass die implementierten Maßnahmen erfolgreich waren und sich die Güte der Vorhersage den international geforderten Standards (TJSIT) deutlich annähert. Die Berücksichtigung weiterer Prozesse im Turbulenzschema beziehungsweise die allgemeine Verbesserung der über die Skalenwechselwirkung beteiligten Parametrisierungen im Vorhersagemodell können unter Nutzung des Programmpaketes TMOS (und dem enthaltenen Potential zur statistischen Nachbehandlung) die EDP-Vorhersage noch weiter optimieren. Neben der Beseitigung sowohl von numerischen Artefakten der Modellierung als auch von möglichen weiteren Artefakten in den flugzeuggestützten Turbulenzmessungen gehören hierzu insbesondere auch die Behandlung von Schwerewellen und der Horizontaltransport von Turbulenzfeldern. Durch den Übergang zum künftigen ICON-Modell können in dem für die Luftfahrt relevanten Höhenbereich zusätzliche Modellschichten erwartet werden, was (wie eine generelle Erhöhung der Modellauflösung) von weiterem Vorteil wäre. Bei der Verifikation des Vorhersageverfahrens sollte allerdings beachtet werden, dass die hierzu verwendeten Methoden zur Messung der EDR offensichtlich unterschiedliche statistische Korrekturen hervorrufen können. Neue Darstellungsformen von Turbulenzfeldern (etwa Maximalwerte innerhalb vertikaler Säulen oder auch 3D-Ansichten) unterstützen die Lokalisierung von vorhergesagten Turbulenzfeldern. Sie sind aber bezüglich einer raschen quantitativen Einschätzung der Gefährdung des Luftverkehrs durch Turbulenz im Routinebetrieb noch zu bewerten.

## Literatur

- ABERNETHY, J., 2008: A Domain Analysis Approach to Clear-air Turbulence Forecasting Using High-density In-situ Measurements. *University of Colorado at Boulder*.
- BALDAUF, M., SEIFERT, A., FÖRSTNER, J. MAJEWSKI, D., RASCHENDORFER, M., REINHARDT, T., 2011: Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities. *Monthly Weather Review*, doi: 10.1175/MWR-D-10-05013.1
- DOMS, G., et al., 2011: Nonhydrostatic Regional COSMO Model. Part II: Physical Parameterization, available from <http://www.cosmo-model.org>.
- ELLROD, G.P., KNAPP, D.I., 1992: An objective clear-air turbulence forecasting technique: verification and operational use. *Weather and forecasting* 7, 150-156.

- ELLROD, G.P., KNOX, J.A., 2010: Improvements to an Operational Clear-Air Turbulence Diagnostic Index by Addition of a Divergence. *AMS* **25**, 789-798.
- KIM, J.-H., CHUN, H.-Y., SHARMAN, R. D., KELLER, T. L., 2011: Evaluations of upper-level turbulence diagnostics performance using the Graphical Turbulence Guidance (GTG) system and Pilot Reports (PIREPs) over East Asia. *J. Appl. Meteor. Clim.* **50**, 1936-1951.
- MCCANN, W., KNOX, J.A., WILLIAMS, P.D., 2012: An improvement in clear-air turbulence forecasting based on spontaneous imbalance theory: the ULTURB algorithm. *Meteorol Appl.* **19**, 71-78.
- KNÜPFER, K., 1996: Methodical and predictability aspects of MOS systems. 13th Con. on *Probability and Statistics in Atmospheric Sciences*, 190-197.
- KOLMOGOROV, A.N., 1941: The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds-numbers. *Doklady ANSSSR* **30**, 301 ff.
- KUHL, T., 2006: Studies in forecasting upper-level turbulence. NPS, California, USA.
- LOTT, F., MILLER, M., 1997: A new subgrid-scale orographic drag parameterization: Its formulation and testing. *Q. J. R. Meteor. Soc.* **123**, 101-127.
- LANE, T.P., et al., 2012: Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **93**, 499-515.
- MELLOR, G., YAMADA, T., 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. and Space Phys.* **20**, 851-875.
- PEARSON, J., 2013: Calibration of in situ eddy dissipation rate (EDR) severity thresholds based on comparisons to turbulence pilot reports. 16. *ARAM*, Austin, USA.
- RASCHENDORFER, M., 2001: The new turbulence parameterization of LM. *COSMO Newsletter* **1**, 89-97, available from <http://www.cosmo-model.org>.
- RUIZ, D., 2008: A parallel Matrix Scaling Algorithm in High performance computing for computer science. VECPAR 2008. *Springer-Verlag*, Berlin.
- SHARMAN, R., et al., 2002: Climatologies of upper-level turbulence over the Continental U.S. and Oceans. 10<sup>th</sup> *Conf. of Aviation, Range and Aerospace Meteorology*, Portland, OR.
- SHARMAN, R., et al., 2004: Description and evaluation of the second generation Graphical Turbulence Guidance forecasting system. 11<sup>th</sup> *Conf. of Aviation, Range and Aerospace Meteorology*.
- SHARMAN, R., TEBALDI, C., WIENER, G., WOLFF, J., 2005: An Integrated Approach to Mid- and Upper-Level Turbulence Forecasting. *Wea. Forecast* **21**, 268-287.
- SHARMAN, R., et al., 2012: Sources and dynamics of turbulence in the upper troposphere and lower stratosphere: A review. *Geophys. Res. Lett.* **39**, L12803, doi:10.1029/2012GL051996.
- WMO, 2003: AMDAR Reference Manual. *WMO*, WMO-No. **958**.

R. HEISE, D. ETLING

# 15 Schwerewellen und Rotoren

Gravity waves and rotors

## Zusammenfassung

Schwerewellen und Rotoren sind als meteorologische Phänomene seit langem mit der Luftfahrt verbunden. Einerseits ermöglichen stationäre Wellenaufwinde im Lee von Gebirgen Luftsportlern ausgedehnte Streckenflüge als auch Höhenrekorde. Auf der anderen Seite stellt die Turbulenz in brechenden Schwerewellen am Rand der Tropopause und in Rotoren in der atmosphärischen Grenzschicht ein erhebliches Flugsicherheitsrisiko dar.

## Summary

Gravity waves and rotors have been known in aviation for a long time. On the one hand, stationary updrafts have been used by air sports pilots for long distance and high altitude flights. On the other side, turbulence in breaking gravity waves near the tropopause and in boundary layer rotors are possible risks for flight safety.

## 1 Einführung

Das Thema Wellen und Rotoren wurde in der PROMET Reihe bereits im Heft 1/2 (2006) mit der Gesamthematik Atmosphäre und Gebirge behandelt. Dort hatten DÖRNBRACK et al. (2006) neben der allgemeinen Darstellung von Schwerewellen bereits in einem separaten Kapitel auf die Auswirkungen des Systems Welle-Rotor auf die Luftfahrt hingewiesen. Die hier vorliegende Behandlung des Themas erweitert den damaligen PROMET-Artikel von DÖRNBRACK et al. (2006) um die Nutzung der Wellenaufwinde durch Segelflieger sowie um die Vorhersagen von Wellen und Rotoren mit Hilfe der numerischen Wettervorhersage.

Das Thema Schwerewellen in der Atmosphäre wird umfangreich in den neueren Monografien von NAPPO (2012) und SUTHERLAND (2010) behandelt. Wir beschränken uns hier wegen des besonderen Bezugs zur Aviatik auf solche Schwerewellen, die durch Gebirge induziert werden. Die schematische Darstellung solcher Wellen in Abb. 15-1 verdeutlicht diesen Aspekt anschaulich. Neben dem Verlauf von Stromlinien und den in den Aufwindgebieten der Wellen entstehenden Wolken zeigt die Abbildung die Gefährdung von Luftfahrzeugen durch Rotoren in den unteren Atmosphärenschichten sowie durch brechende Schwerewellen im oberen Bereich der Troposphäre. Den Rotoren widmen wir eigene Abschnitte am Ende dieses Aufsatzes. Zur Vervollständigung sollte in dem Kontext

erwähnt werden, das sich die Thematik auch im Bereich der Hydrosphäre speziell bei hydrodynamischen Prozessen in den Ozeanen bei entsprechender Orographie (siehe Beobachtung interner Wellen bei U-Boot-Missionen in SCHMAGER 2012) darstellt.

## 2 Schwerewellen

### 2.1 Schwingungen in der Atmosphäre

Der Begriff *Schwerewelle* hängt mit der Schwerkraft zusammen, welche über den Archimedischen Auftrieb in einer stabil geschichteten Atmosphäre Schwingungen von Luftpaketen in der Vertikalen ermöglicht. Hierbei spielt die sogenannte *Brunt-Väisälä-Frequenz*  $N$  eine wichtige Rolle. Diese verknüpft die Schwerebeschleunigung  $g$  mit dem vertikalen Gradienten der potenziellen Temperatur  $\theta$  über:

$$N^2 = g/\theta \, d\theta/dz \quad (1)$$

Die Schwingungsdauer ergibt sich daraus zu  $T = 2\pi/N$ . Nehmen wir als praktisches Beispiel die in der Luftfahrt verwendete ICAO – Standardatmosphäre (ISA). In dieser ist  $d\theta/dz = 3,5 \text{ K/km}$  und somit  $N = 0,01 \text{ 1/s}$ . Dies ist ein typischer Wert für  $N$  in einer stabil geschichteten Atmosphäre. Als Schwingungsdauer ergibt sich daraus:  $T \approx 10$  Minuten.

Insgesamt ermöglicht der Archimedische Auftrieb (im englischen *buoyancy force* genannt) vertikale Schwingungen in einer stabil geschichteten Atmosphäre. Da Wellen salopp gesagt Schwingungen in Raum und Zeit sind, ergeben sich sogenannte Schwerewellen, wenn nicht nur ein isoliertes Luftpaket schwingt, sondern sich alle Luftpakete in einer stabilen Schichtung zu einer räumlich organisierten Schwingung zusammenschließen.

## 2.2 Gebirgswellen

### 2.2.1 Einführung

Gebirgswellen entstehen beim Überströmen einer stabil geschichteten Atmosphäre von möglichst quasi zweidimensionalen Bergrücken. Die Orografie dient dabei als Anregungsmechanismus für Schwerewellen, da die Luft am Luvhang zum Aufsteigen gezwungen wird und somit die zum Einsetzen der Schwingungen benötigte Auslenkung aus der Gleichgewichtslage erfährt. Ob nun im Lee eines angeströmten Gebirges auch tatsächlich Schwerewellen auftreten, hängt von vielen Faktoren ab. Neben der Mindestvoraussetzung einer stabilen Schichtung wird die Wellenbildung vom Vertikalprofil des Horizontalwindes sowie von Höhe, Breite und Form des Gebirges beeinflusst (DURRAN 2003). In den folgenden Abschnitten sei lediglich auf zwei Hauptformen eingegangen, die auch für die Luftfahrt von Interesse sind.

Zuvor gehen wir noch kurz auf den sogenannten *Scorer-Parameter* ein, der in der Wellendynamik eine wichtige Rolle spielt. Die Schwingungsfähigkeit der Atmosphäre als Voraussetzung für die Ausbildung von Schwerewellen wurde in Abschnitt 2.1 durch die *Brunt-Väisälä-Frequenz*  $N$  beschrieben. Bei den Gebirgswellen kommt als zweiter wichtiger Parameter die Windgeschwindigkeit der ankommenden Luftströmung hinzu. Der Einfachheit halber soll angenommen werden, dass der Wind seine Richtung nicht mit der Höhe ändert (eine zu starke Windrichtungsänderung führt zur Dämpfung von Schwerewellen die durch Gebirge angeregt werden). Die Anströmgeschwindigkeit sei im Folgenden mit  $U(z)$  bezeichnet. In den Gleichungen zur Beschreibung von Schwerewellen kommen  $N(z)$  und  $U(z)$  in der Kombination  $N/U$  vor, die in der Literatur als *Scorer-Parameter* bezeichnet wird (nach dem britischen Mathematiker R. Scorer, der als einer der Ersten die Ausbildung von Leewellen beschrieben hat; SCORER 1949). Hier soll dieser Parameter mit  $S$  bezeichnet werden:

$$S(z) = N(z)/U(z) \tag{2}$$

Da der Scorer-Parameter in den relevanten Gleichungen in Form einer Wellenzahl auftritt kann diesem auch eine Wellenlänge zugeordnet werden, die hier als *Scorer-Länge*  $L_s$  bezeichnet werden soll:

$$L_s = 2\pi U/N \tag{3}$$

Die Scorer-Länge entspricht der Wellenlänge stationärer Schwerewellen in einer Strömung mit konstantem Wind  $U$  und konstanter Schichtung  $N$ . Um eine Vorstellung davon zu bekommen, welche Wellenlängen bei Schwerewellen typischerweise auftreten, ist in Tabelle 15-1 die Scorer-Länge für verschiedene Kombinationen von Schichtung (hier als Temperaturgradient  $d\theta/dz$ ) und Windgeschwindigkeit  $U$  dargestellt.

$d\theta/dz$ (K/100m)	U (m/s)		
	10	20	30
0,35	6,3	12,6	18,9
1,0	3,5	7,0	10,5
3,0	2,0	4,0	6,0

Tab. 15-1: Scorer-Länge  $L_s = 2\pi U/N$  (in km) für verschiedene Kombinationen der thermischen Schichtung ( $d\theta/dz$  in K/100 m) und der Windgeschwindigkeit ( $U$  in m/s). Der Temperaturgradient von 0,35 K/100m entspricht der ICAO-Standardatmosphäre.

Die Darstellung des vertikalen Verlaufs des Scorer-Parameters ist bei aktuellen Radiosondenaufstiegen und Modell-Temps numerischer Wettervorhersagemodelle über das Selbstbriefingsystem des DWD „pc\_met“ (Software) und über Fachsysteme nationaler Wetterdienste (GGS NinJo ab Version 1.8) verfügbar und erlaubt somit eine Unterscheidung der Wellenformen (Kapitel 2.2.2 und 2.2.3).

Bei der Behandlung von gebirgsinduzierten Schwerewellen wird häufig auch die sogenannte *Froude-Zahl* ( $Fr$ ) verwendet, die sich aus der Kombination des Scorer-Parameters  $S (= N/U)$  mit der Berghöhe  $H$  ergibt:

$$Fr = U/(HN) \tag{4}$$

Sie ermöglicht nach MASTELER und NILTON (2005) eine Differenzierung zwischen schwachen ( $Fr \leq \sim 0,3$ ) und starken Wellen ( $Fr \geq \sim 0,5$ ) sowie eine Aussage über die vertikale Ausdehnung des Wellensystems.

### 2.2.2 Vertikal propagierende Schwerewellen

Bei der Bestimmung der Wellenformen kommt es auf das Verhältnis der Scorer-Länge  $L_s$  zur Länge  $L$  des überströmten Berges an (DURRAN 2003).

Für den Fall  $L_s \ll L$ , der meist bei der Überströmung größerer Gebirge wie den Anden oder der Sierra Nevada auftritt, erhält man sogenannte vertikal propagierende hydrostatische Schwerewellen, die schematisch in Abb. 15-1 dargestellt sind. Dabei entsteht meist nur ein Wellenzug direkt über dem Gebirge, welcher allerdings sehr weit in die Troposphäre, unter günstigen Umständen sogar bis in die Stratosphäre, seine Energie transportieren kann. Dazu ist eine annähernde Höhenkonstanz des Scorer-Parameters  $S$  oder der Scorer-Länge  $L_s$  notwendig. Daher ist diese Wellenform für den Flugverkehr interessant, da sich dieser in solchen Höhenbereichen abspielt. Lenticularis-Wolken sind bei dieser Form nicht bestimmend. Vielmehr erscheint im oberen Bereich der Troposphäre ein markantes quasistationäres Cirrus-Band.

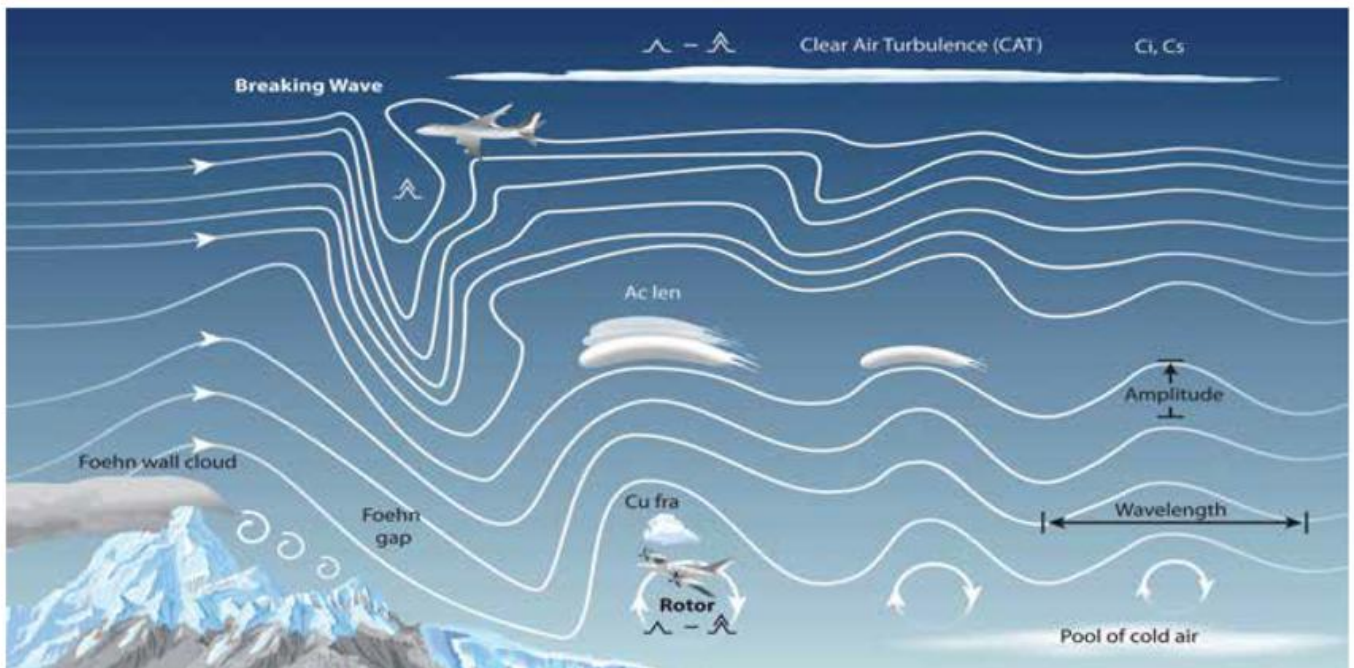


Abb. 15-1: Schema des Welle-Rotor-Systems im Lee von Gebirgen. Skizziert sind auch Gebiete, in denen eine Gefährdung des Luftverkehrs auftreten kann. Obere Bildhälfte: Turbulenz durch brechende Wellen meist der Clear Air Turbulence (CAT) zugeordnet; untere Bildhälfte: Rotorturbulenz im Bereich der Leewellen. Beide Turbulenzarten treten in der Praxis nicht gleichzeitig auf sondern getrennt bei verschiedenen meteorologischen Bedingungen (siehe Text Kapitel 2). Copyright: Mountain Wave Project.

Das in Abb. 15-1 angedeutete Brechen von Schwerewellen ist dabei für den Flugverkehr von besonderem Interesse, da hierbei starke Turbulenzen (Clear Air Turbulence, CAT) auftreten, die zu erheblichen Schäden führen können. Von den zahlreichen Publikationen über das Durchfliegen von Gebieten mit CAT seien hier lediglich neuere Analysen zu brechenden Schwerewellen über den Alpen (JIANG und DOYLE 2004), den Rocky Mountains (WOLFF und SHARMAN 2008) sowie über Grönland (LANE et al. 2009) genannt. Als grobes Maß für das Auftreten von Wellenbrechen hat sich aus diesen Untersuchungen ein Wert für die Froude-Zahl von  $Fr \approx 1,2$  ergeben.

### 2.2.3 Gefangene Schwerewellen (Leewellen)

Für den Fall  $L_r \approx L$  treten sogenannte nicht-hydrostatische Schwerewellen auf, die sich sowohl in der Vertikalen als auch in der Horizontalen im Lee des Gebirges ausbreiten. Nimmt nun zusätzlich der Scorer-Parameter  $S(z)$  mit der Höhe ab, was einer Zunahme der Scorer-Länge  $L_s(z)$  entspricht, so treten sogenannte gefangene Wellen auf, wie in Abb. 15-1 dargestellt. Hiermit ist gemeint, dass sich die Wellen nur bis zu einer gewissen Höhe in der Vertikalen ausbreiten (typischerweise 5 bis 8 km) und darüber ausgedämpft werden. Dafür sind mehrere Wellenzüge im Lee des Gebirges möglich, wie auch auf dem Satellitenbild in Abb. 15-3 zu sehen. Entsprechend Tabelle 15-1 treten solche Wellenformen bevorzugt im Bereich kleinerer Gebirge wie zum Beispiel in den deutschen Mittelgebirgen auf.

Auch diese sogenannten Leewellen sind für den Flugverkehr von Interesse und zwar in verschiedener Hinsicht. Zum einen ermöglichen die ortsfesten Aufwindgebiete im Lee des Gebirges lange Flüge mit Segelflugzeugen (siehe

Kapitel 3), zum anderen stellen die mit dem Wellensystem im Bereich der atmosphärischen Grenzschicht verknüpften Rotoren (siehe Abb. 15-1) eine Gefahr für jede Art von Flugverkehr dar.

## 3 Schwerewellen und Segelflug

Bereits im PROMET-Artikel von DÖRNBRACK et al (2006) wurde auf die Entdeckung der Gebirgswellen durch Segelflieger in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts hingewiesen. Dabei wurde insbesondere die wissenschaftliche Auswertung von Wellenflügen durch KÜTTNER (1939) erwähnt. Die Erkenntnis, dass Gebirgswellen quasi stationäre Aufwindgebiete großer räumlicher Ausdehnung und langer Andauer für die Segelflieger bereitstellen, hat der Wellenfliegerei in den letzten Jahrzehnten eine Anzahl von Rekordflügen erlaubt, die vorher nicht für möglich gehalten wurden. Es sei hier der längste Segelflug aller Zeiten über 3009 km (Federation Aeronautique Internationale, FAI-Kategorie freie Distanz über 3 Wendepunkte, [www.fai.org/igc-records](http://www.fai.org/igc-records)) aus dem Jahr 2003 sowie der Rekord über eine freie gerade Strecke (OSTIV-Küttner-Preis, OSTIV = Organisation Cientifique et Technique Internationale du Vol a Voile) von 2123 km aus dem Jahr 2003 genannt, die beide vom deutschen Piloten Klaus Ohlmann gehalten werden. Diese Streckenrekorde wurden im Leewellensystem der Anden erflogen und wären ohne eine zuverlässige Prognose der Gebirgswellen durch Meteorologen nicht möglich gewesen (siehe hierzu Abschnitt 4). Hierbei stellte der zuletzt erwähnte Weltrekordflug vom Süden Patagoniens bis in die Wellensysteme der Hochkordillere der Tupungato-Aconcagua-Region mit der Distanz von über 2000 km durch die optimale Nutzung von Jet Stream-Konstellationen eine be-

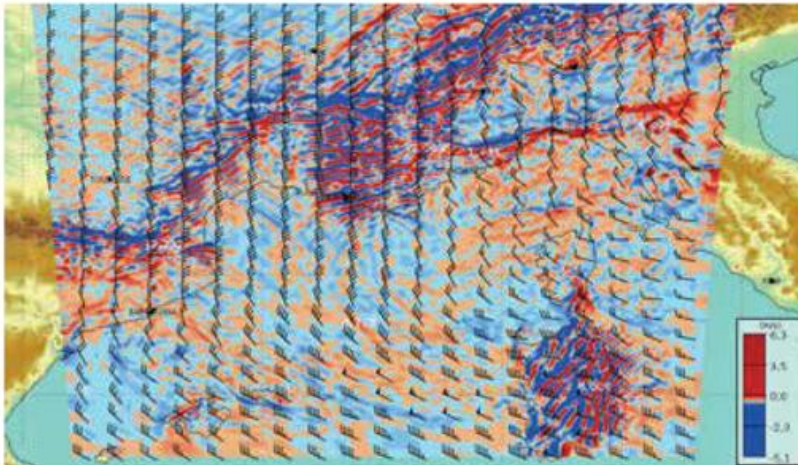


Abb. 15-2: Vorhersage der Vertikalgeschwindigkeit im Alpenraum für die Flughöhe FL100 für den 08.04.2012, 09 UTC, durch das RLMK-Modell des GeoInfoDBw (COSMO-DE/DWD).

sondere luftsportliche Herausforderung dar. Ein überzeugender Beweis des Verständnisses komplexer meteorologischer Prozesse und fliegerischer Fertigkeiten. Der räumliche und zeitliche Scale atmosphärischer Bewegungsformen hatte bis zu diesem Zeitpunkt zunächst Rekordflüge nur bis etwa 1500 km Streckenlänge vermuten lassen.

Auch der Höhenweltrekord über 15 460 m, im Jahr 2006 geflogen von Steve Fossett und Einar Enevoldson erfolgte im Aufwindbereich sehr hochreichender Gebirgswellen (siehe Abschnitt 3.2) im Lee der Anden. Bereits Joachim Küttner konnte 1955 im Rahmen des Jet Stream Projektes mit dem Segelflugzeug eine Höhe von 13 015 m erreichen und hält damit bis heute den Deutschen Höhenrekord. Im Rahmen des sogenannten PERLAN (Kunstwort für Perlmutterwolken) -Projektes ([www.perlanproject.org](http://www.perlanproject.org)) ist geplant, mit dem Segelflugzeug in die Stratosphäre in Höhen bis zu 27 km vorzudringen.

In Norddeutschland haben sich interessierte Wellenflieger im Projekt Mittelgebirgslee-welle ([www.schwerewelle.de](http://www.schwerewelle.de)) zusammengeschlossen (DUMMANN 2009). Mit Hilfe von Vorhersagen von Meteorologen und der Routinemodelle COSMO-EU und COSMO-DE werden für Segelflieger Prognosen von Lee-wellen im Bereich der Norddeutschen Mittelgebirge wie Harz und Thüringer Wald erstellt. Im Gegenzug stellen die Piloten ihre Flugberichte zur Verfügung, so dass die Wellenvorhersage vor Ort verifiziert werden kann.

Die praktische Ausnutzung von Gebirgswellen für den Segelflug allgemein wird in OSTIV (2009) und HERTENSTEIN (2011) im Detail beschrieben. Neben den Leewellen werden von Segelfliegern auch solche Schwerewellen ausgenutzt, die durch Konvektionselemente (zum Beispiel Cumuluswolken) in einer konvektiven atmosphärischen Grenzschicht angeregt werden, wenn diese an die

darüber liegende Inversionsschicht stoßen. Diese in der Literatur als thermal waves oder convection waves bezeichneten Schwerewellen sind zum Beispiel in HAUF und CLARK (1989) beschrieben.

In einer anderen Dimension was die Größe der Gebirge und der durch sie ausgelösten Schwerewellen anbelangt, bewegt sich das Mountain Wave Project MWP ([www.mountain-wave-project.com](http://www.mountain-wave-project.com)) der wissenschaftlichen und meteorologischen Sektion der OSTIV (ein assoziiertes Mitglied der FAI).

Unter der Leitung des Piloten und Meteorologen R. Heise und dem Rekordpiloten K. Ohlmann (über 50 Weltrekorde) sowie J. Hacker vom Airborne Research Australia wird das System Welle-Rotor in verschiedenen Gebirgsgegenden der Welt mit Hilfe von Hochleistungssegelflugzeugen, ausgerüstet mit modernster Messsensorik, wissenschaftlich untersucht. Ziel des Projektes ist es unter anderem, das Auftreten von Leewellen und Rotoren für die jeweiligen Gebiete zu dokumentieren und so eine Hilfestellung zur Ausnutzung der Wellenaufwinde und zur Vermeidung der gefährlichen Rotoren als Beitrag zur Erhöhung der Flugsicherheit zu geben. Die maximal von Ohlmann global beobachteten Vertikalgeschwindigkeiten in Wellen betrug in den letzten 40 Jahren etwa 19 m/s integriertes Steigen in 9000 m Höhe über der Cordillera del Viento (Argentinien), am Mt. Rosa (Italien) etwa 16 m/s und Pic de Bure (Frankreich) etwa 14 m/s. Zusätzlich erfolgten flugzeuggestützte Messkampagnen atmosphärischer Parameter (OSTIV, 2009, beziehungsweise Abb. 15-4 (b)). In Kombination mit entwickelten Wellenvorhersageverfahren erfolgten Planungen diverser Rekordflüge neuer Dimensionen wie zum Beispiel eingangs geschildert.



Abb. 15-3: METEOSAT 9-Satellitenbild (VIS) für den Vorhersagetermin in Abb. 15-2, 08.04.2012, 09 UTC (Quelle: EUMETSAT/DWD). Die Leewellen im Bereich der Alpen sind im linken Bildteil zu erkennen.

#### 4 Vorhersage von Schwerewellen

Angesichts der vielen Faktoren, die bei der Entstehung von Schwerewellen im Bereich von Gebirgen eine Rolle spielen (siehe Abschnitt 2) besteht die effektivste Möglichkeit zur Vorhersage von Gebirgswellen in der Ausgabe entsprechender Parameterfelder als Produkt der numerischen Wettervorhersage. Hierbei kommt es auf die horizontale Gitterweite der Modelle an. Wenn ein atmosphärisches Phänomen einigermaßen durch die Modelle aufgelöst werden soll, muss dieses durch vier Gitterpunkte erfasst werden. Die Ausdehnung eines Wetterphänomens sollte somit größer als  $4\Delta x$  sein, wobei  $\Delta x$  die Gitterweite des Modells ist. Anders ausgedrückt sollte die Gitterweite geringer als ein Viertel der Objektausdehnung sein. In Tabelle 15-1 wurden typische Wellenlängen von Schwerewellen aufgeführt. Diese liegen im Bereich 10 bis 20 km. Somit sollte die Modellauflösung weniger als 4 km betragen. Dies ist erst seit neuerem in der Routinevorhersage der Wetterdienste der Fall, beim DWD wird diese Bedingung durch das Modell COSMO-DE erfüllt (hier ist  $\Delta x = 2,8$  km). In der Tat werden Schwerewellen durch das nichthydrostatische COSMO-DE-Modell aufgelöst wie das unten angeführte Beispiel eindrucksvoll zeigt.

Bei `pc_met` werden die Parameterfelder der Vertikalgeschwindigkeit für die einzelnen Höhen im Band von 500 m bis 8000 m für den Bereich Deutschland und den nördlichen Teil der Alpen beziehungsweise Alpenhauptkamm (COSMO-DE-Modellgebiet) seit einigen Jahren für Kunden der Luftfahrt bis zum Prognosezeitpunkt  $T + 21$  h bereitgestellt.

Der Geoinformationsdienst der Bundeswehr (GeoInfDBw) verfügt in diesem Zusammenhang über die Fähigkeit das COSMO-DE außerhalb dieses Gebietes einzusetzen (Bezeichnung RLMK). Als Beispiel für den südlichen Teil der Alpen sei hier die Wellenvorhersage für den 08. April 2012 für FL 100 in Abb. 15-2 dargestellt. Es werden für große Teile der Alpen, für die Pyrenäen sowie Korsika bzw. Sardinien Schwerewellen vorhergesagt, wobei die maximalen Vertikalgeschwindigkeiten mehr als  $\pm 6$  m/s betragen! Ein solch starkes Welleneignis müsste gut in den Wolkenformen auf Satellitenbildern zu sehen sein, wenn die Feuchteverhältnisse es erlauben. In der Tat zeigt das Satellitenbild in Abb. 15-3 für den gleichen Termin zahlreiche Schwerewellen im Bereich des Vorhersagegebietes. Damit kann für diesen Termin die Wellenvorhersage des RLMK/COSMO-DE bestätigt werden. Eine quantitative Verifikation hinsichtlich der Wellenstärke (Auf- und Abwinde) ist damit natürlich nicht möglich. Hier helfen nun die im Abschnitt 3 erwähnten Segelflieger, die sich anhand der Vorhersage großräumiger Wellenmuster von `pc_met` orientieren, die Wellenaufwinde erfliegen und optimal für Langstreckenflüge ausnutzen. Wellenflugberichte der Piloten und Daten des Global Navigation Satellite System (GNSS) Flight Recorder erlauben dann erste Verifikationen dieser neuen Modellparameter Vorhersagen. In diesem Fall ist

dies durch den MWP-Piloten Klaus Ohlmann geschehen, der an diesem Tag im dargestellten Wellengebiet in der Provence (Mt. Ventoux bis Pic de Bure) Wellenaufwinde von 5 bis 7 m/s beobachtete und im Rotor ein extrem turbulentes Steigen von bis zu  $\pm 11$  m/s vorfand. Dem Piloten gelang bei dieser Starkwindwetterlage (Mistral) in den Aufwindsystemen ein außergewöhnlicher Streckenflug mit einer Distanz von 1427 km.

Auch für den deutschen Mittelgebirgsraum kann die COSMO-DE-Vorhersage durch Segelflieger bestätigt werden. Deren Flugberichte werden regelmäßig unter [www.schwerewelle.de](http://www.schwerewelle.de) veröffentlicht, wobei neben der Angabe der Gebiete von Wellenaufwinden besonders die aus den beobachteten Steigwerten der Flugzeuge abgeleiteten Werte der Vertikalgeschwindigkeiten in Leewellen interessieren.

#### 5 Gefährdung des Flugverkehrs durch Schwerewellen

Die orographisch erzeugte Turbulenz hat einen erheblichen Einfluss auf die Flugsicherheit sowie die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und Kapazitäten in der Luftfahrt. Im Zuge des weltweit zunehmenden Flugverkehrs und der Flugzeugdichte im Luftraum gewinnt dieser Sachverhalt zunehmend an Bedeutung. Neue Konzepte der Luftfahrt (*Next Generation Air Transportation System (NextGen)*, *Single European Sky ATM Research Program (SESAR)*) widmen sich demzufolge verstärkt Projekten der Turbulenzvorhersage. Turbulenz war gemäß der Auswertung des National Safety Transportation Board (2011) in den Jahren 2007 bis 2009 mit Abstand die meist verbreitete Unfallursache verschiedener Flugzeugtypen in den USA (1/3 aller Flugunfälle nach Part 121) und führte zu 29 schwerverletzten Passagieren beziehungsweise Crewmitgliedern. Von 1991 bis 2001 gab es in den USA 509 Flugunfälle durch Turbulenz davon 115 mit letalem Ausgang. Auf die Allgemeine Luftfahrt entfielen davon 416 Unfälle. 16 Fälle wurden hier der Ursache Leewellen (Mountain Wave) zugeordnet (NATIONAL AVIATION SAFETY DATA ANALYSIS CENTER 2004).

Neuere Untersuchungen zur Gefährdung des Flugverkehrs durch Schwerewellen wurden bereits in Abschnitt 2.2.2 zitiert.

Neben orografisch bedingten Schwerewellen spielen zunehmend auch solche Wellen eine Rolle in der Luftfahrt, die durch hochreichende Konvektionswolken (Cumulonimbus) angeregt werden. Die damit verbundenen Turbulenzerscheinungen werden in der Literatur unter dem Begriff *Convective Induced Turbulence (CIT)* zusammengefasst. Es fehlt hier der Platz, um das Problem CIT und Luftverkehr zu diskutieren. Hierfür verweisen wir auf den Übersichtsartikel von LANE et al. (2012).

Computergestützte Algorithmen des Autopiloten verschiedener Flugzeugmuster zeigen Schwierigkeiten bei

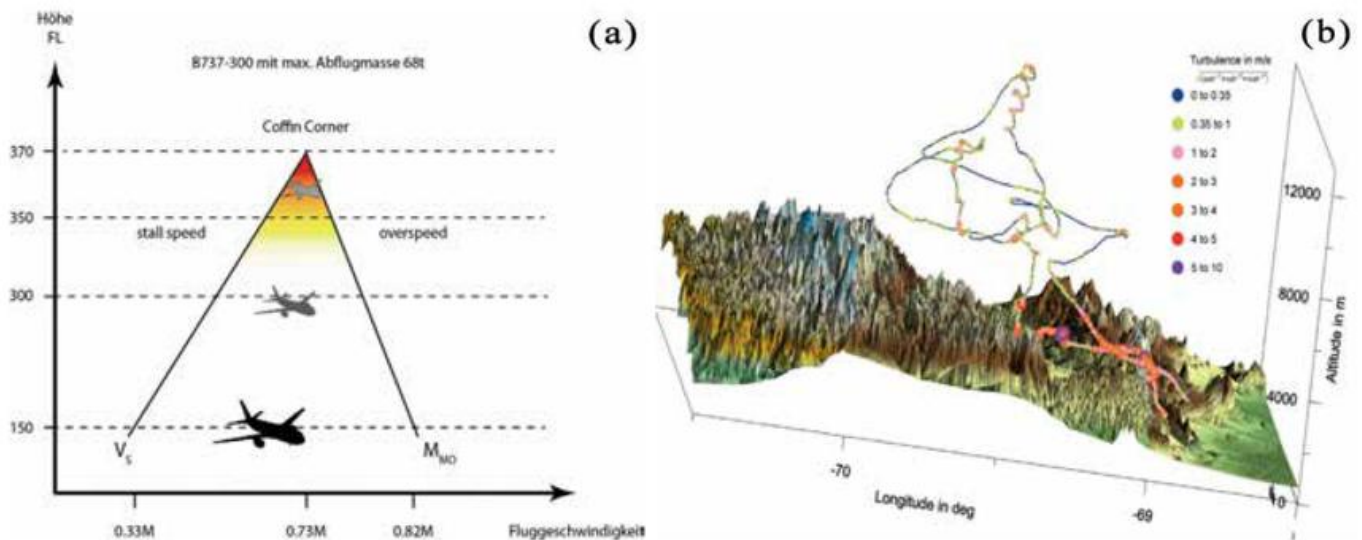


Abb. 15-4: (a) Skizzierter Zusammenhang der Annäherung der Mindest- ( $V_s$ - stall speed) und Maximalfluggeschwindigkeit (*maximum operational Mach Number*,  $M_{MO}$ ) einer Boeing B737-300 bei maximal möglicher Abflugmasse (68 t) und zunehmender Höhe. Bei Flügen in der Flughöhe kurz vor der *Coffin Corner* (englisch für „Sargecke“) besteht die Gefahr des Strömungsabrisses bei Kurvenflug und Turbulenz. (b) Turbulenzmessung mit BATprobe über dem Tupungato-Aconcagua bis 12 500 m Höhe im Rahmen der Forschungsexpedition des *Mountain Wave Project*. Im unteren Bereich vor allem bei den Rotoren wurde starke Turbulenz gemessen. In der Höhe in dem Wellensystem nur schwach bis mäßige Turbulenz. Quelle: Mountain Wave Project.

der Bewältigung der durch Schwerewellen verursachten starken horizontalen und vertikalen Windscherungen. Zahlreiche Zwischenfälle (Incident-Kriterien) belegen dieses Problem. Diese Reports sind von Seiten der Luftfahrzeughersteller und Luftverkehrsgesellschaften nicht öffentlich bzw. stark begrenzt zugänglich. Bei modernen Flugzeugen mit hoher aerodynamischer Güte (geringer Widerstand) kann bei zunehmender Gegenwindkomponente (die durch die von Wellen verursachten Windscherungen entsteht) unter Umständen die Zunahme der Fluggeschwindigkeit (engl. *indicated airspeed*) kritische Werte (*overspeed*) trotz Leerlaufstellung der Triebwerke erreichen. Je nach Regelungsprogramm der automatischen Triebwerkssteuerung (*auto thrust*) wird versucht diese Energie durch leichtes Hochziehen beziehungsweise ein sofortiges Verlassen der Flughöhe und Nutzung eines höheren Flight Levels abzubauen. Um bei Wellen mit kurzer Wellenlänge den Fluktuationen der Vertikalgeschwindigkeit (down- beziehungsweise updrafts) zu entgehen und den Passagierkomfort in der kommerziellen Luftfahrt zu gewährleisten, erfolgt meist ein Wechsel der Flughöhe. **Pilot Reports** (PIREP's) der Flugzeuge bilden hier weiterhin die Planungsgrundlage.

Der Zwischenfall BARREL (1987) belegt anschaulich die Bedeutung für die militärische Luftfahrt. Beim Abflug von der kanadischen Militärbasis Goose Bay geriet das Tankflugzeug VC-10 der Royal Air Force in extrem turbulente Wellensysteme mit starken Nick- und Rollmomenten des Luftfahrzeugs. Die Einhaltung des Flugregimes (Klappenstellung und Triebwerksleistung) in den vorgegebenen Grenzwerten war durch starke Fluggeschwindigkeitsänderungen bedingt durch Windscherungen nahezu unmöglich. Es bestand die unmittelbare Gefahr dass das Lastvielfache des Flugzeugs überschritten wird. Die Aussage des Piloten „die Beherrschung des Luftfahrzeugs hing am seide-

nen Faden“ verdeutlicht die Dramatik im Cockpit. Zudem bedeutet eine Veränderung des Flugzeugschwerpunktes durch eine Lageverschiebung der Fracht beziehungsweise Transportgutes durch starke Turbulenzen eine Limitierung der Einsatzfähigkeit. Eine besondere Bedeutung kommt diesem Fakt bei taktischen Flügen der militärischen Luftfahrzeuge zu.

Bei brechenden Wellen (siehe Abb. 15-1) werden oft Strukturschäden an der Flugzeugzelle beobachtet. RALPH et al. (1997) untersucht in dem Zusammenhang die extreme Turbulenz einer brechenden Welle über den Rocky Mountains, die zum Verlust eines Triebwerks und Beschädigungen an der Flugzeugflächenspitze einer DC-8 mit Notlandung in Denver führte.

Abb. 15-4 (a) verdeutlicht die fliegerische Herausforderung für Piloten in Wellensystemen mit ihren starken vertikalen Windscherungen. Im Vergleich sind in Abb. 15-4 (b) Turbulenzmessungen des Mountain Wave-Projekt über den Anden bis 12 500 m Höhe dargestellt. Im unteren Höhenbereich (bis FL 250) steht dem Luftfahrzeugführer ein relatives breites Geschwindigkeitsband zwischen Mindestfluggeschwindigkeit und Höchstgeschwindigkeit zur Verfügung. Der starken Turbulenz kann durch Flugzeuggeschwindigkeits- beziehungsweise Triebwerksleistungsveränderungen begegnet werden. Mit zunehmender Höhe verringert sich dieses Band und bei der dort vorhandenen Turbulenz mit nur schwacher bis mäßiger Intensität (Abb. 15-4 (b)) ist der Pilot weiterhin gezwungen, das Luftfahrzeug in seinem verfügbaren Geschwindigkeitsregime beziehungsweise im Flight Level zu halten. Zusätzliche Erläuterungen zur aerodynamischen Thematik „Coffin Corner“ am Beispiel der Parameter einer Boing B737 kann DÖRNBRACK et al. (2006) entnommen werden.

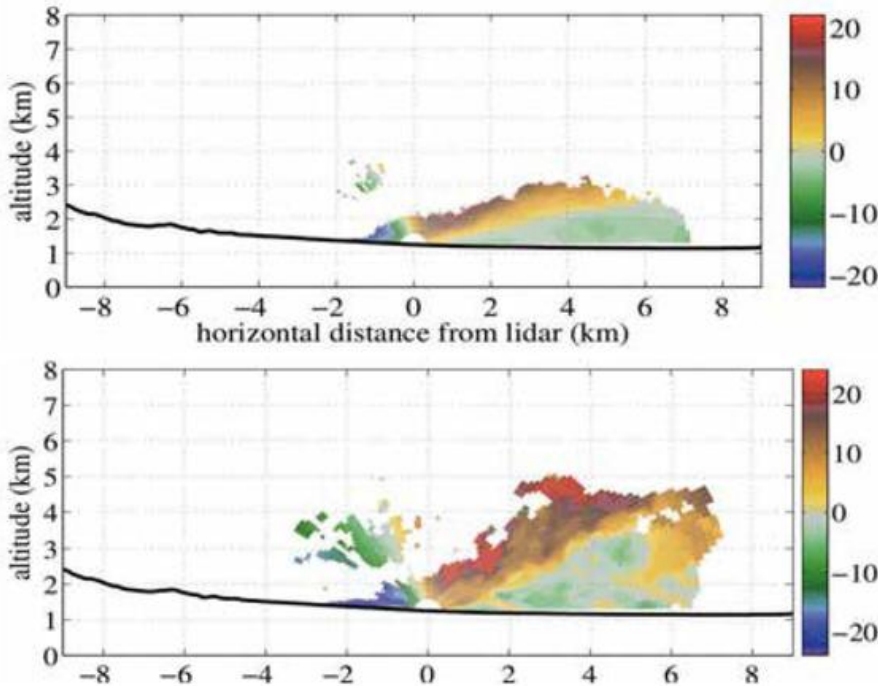


Abb. 15-5: Beobachtung eines Rotors mit dem Doppler-Lidar des DLR während der Feldmesskampagne T-REX. Dargestellt ist die Radialkomponente der Windgeschwindigkeit. Positive Werte: vom Lidar weg, negative Werte: zum Lidar hin. Farbskala: Windgeschwindigkeit in m/s. Im oberen Bildteil ist das 10-Minuten-Mittel der Windmessungen dargestellt. Die Lage des Lidar ist durch den Halbkreis bei 0 km angedeutet. Man erkennt sehr schön das Rückströmen im unteren Teil des Rotors (grünliche Farben). Im unteren Bildteil ist eine Momentanaufnahme des Windfeldes dargestellt, bei der die turbulente Struktur der Rotorströmung zum Ausdruck kommt. Quelle: DLR.

## 6 Rotoren

### 6.1 Einführung

Rotoren sind horizontale Wirbelwalzen in der atmosphärischen Grenzschicht unterhalb der Leewellen wie in Abb. 15-1 skizziert. Im Gegensatz zu den glatt erscheinenden Lenticularis Wolken im oberen Bereich der Wellen (siehe Abb. 15-1) wo der Wind im eigentlichen Sinne durchweht, verursachen Rotoren stark zerklüftete Kumuluswolken (englisch *cloud puffs*). Die Entdeckung der äußerst turbulenten Luftströmung in Rotoren durch den Segelflieger W. Hirth in Schlesien wurde bereits im PROMET-Artikel von DÖRNBRACK et al. eindrucksvoll beschrieben. Auch KÜTTNER (1939) hat bei seiner Kartierung der Leewellen des Riesengebirges die Lage der Rotoren identifiziert (siehe Abb. 3-8 in DÖRNBRACK et al.).

Das erste große Feldexperiment zur Erforschung von Leewellen und Rotoren fand im Jahr 1955 im Bereich des Owens Valley im Lee der Sierra Nevada statt (*Sierra Wave Project*, siehe WHELAN 2000). Das Foto

eines dabei aufgetretenen gewaltigen Rotors der im Lee der Sierra Nevada im Owens Valley bis über 6000 m den Sand aufwirbelte und dem Piloten eines zweimotorigen Kampfflugzeuges (Gesamtgewicht 7 t) vom Typ Lockheed P-38 das Segeln ohne Motorkraft in der Aufwindseite bis 30 000 ft (9144 m) ermöglichte (WHELAN 2000), findet sich in vielen Publikationen zum Rotorproblem (zum Beispiel DALE und DURRAN 2004). Das Folge-Experiment T-REX (*Terrain-induced Rotor Experiment*) wurde 50 Jahre später an gleicher Stelle durchgeführt (GRUBISIC et al., 2008). Bei diesem Experiment wurde auch ein Doppler-Lidar des DLR Oberpfaffenhofen eingesetzt (KÜHNLEIN et al. 2013). Ein Beispiel der Lidar-Messungen für einen Rotorfall ist in Abb. 15-5 dargestellt.

Außer in den genannten Feldexperimenten ist das Rotorproblem hauptsächlich durch eine große Anzahl von numerischen Simulationen behandelt worden, von denen hier nur diejenigen von DOYLE und DURRAN (2004) und VOSPER (2004) genannt werden sollen. Im Wesentlichen hat sich dabei ergeben, dass die Rotoren durch ein Zusammenspiel der Leewellen mit der turbulenten Reibung in der Grenzschicht entstehen. Die Untersuchung von VOSPER hat darüber hinaus den Einfluss einer abgehobenen Inversion bei der Rotorbildung hinter typischen Mittelgebirgen aufgezeigt. Es sind zwar auch Rotoren im

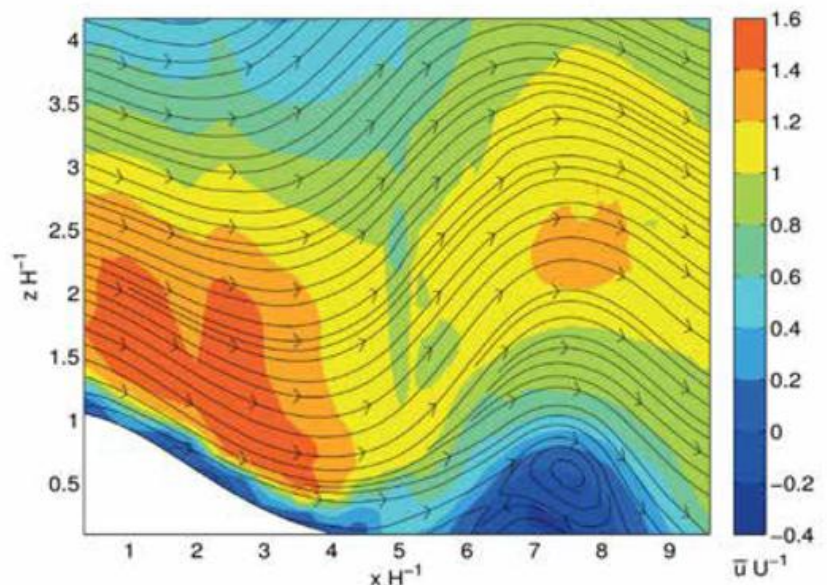


Abb. 15-6: Darstellung einer Rotorströmung aus Laborexperimenten in einem geschichteten Wassertank. Stromlinien (schwarz) und Geschwindigkeitsfeld (farbig). Die Ortsangaben sind mit der Berg- (Hinderniss-) Höhe  $H$  normiert, das Geschwindigkeitsfeld mit der freien Anströmung  $U$ . Quelle: Knigge (2012).

Wellensystem oberhalb der Grenzschicht in solchen Simulationen gefunden worden (siehe DÖRNBRACK et al. 2006), wir beschränken uns aber hier auf die Grenzschichtrotoren, da sie für die Luftfahrt von besonderem Interesse sind.

Die Strömungsverhältnisse in Rotoren sind in den oben erwähnten numerischen Simulationen dargestellt. Wir zeigen hier Ergebnisse von Laborexperimenten zu Leewellen und Rotoren (KNIGGE 2012), aus denen die Rotorstruktur auch sehr schön ersichtlich ist. Die Analyse des Strömungsfeldes mittels PIV (*Particle Image Velocimetry*) ist in Abb. 15-6 dargestellt. Man erkennt die hohen Windgeschwindigkeiten am Leehang vor dem Eintritt in den Rotor und die Rückströmung in Richtung Hindernis (Berg) im unteren Teil der Grenzschicht.

### 6.2 Vorhersage von Rotoren

Soweit den Autoren bekannt ist, wird für die Luftfahrt noch keine routinemäßige Vorhersage für das Auftreten von Rotoren erstellt. Aus den Erfahrungen der Segelflieger kann aber angenommen werden, dass Leewellen im Bereich der Gebirge je nach Höhe des Hindernisses weit im Lee praktisch immer mit Rotoren unterhalb der Gipfelhöhe verbunden sind. Somit könnte eine Leewellenvorhersage (siehe Abschnitt 4) im Prinzip auch als Rotorvorhersage aufgefasst werden, wobei über die Stärke der Rotoren (außer bei den empirischen Daten) noch keine Information vorliegen. Diese ließe sich möglicherweise aus den Daten des COSMO-DE-Modells extrahieren, da dort die Grenzschicht, in welcher die Rotoren auftreten, gut aufgelöst ist. Testrechnungen mit dem Modellparameter turbulente kinetische Energie (TKE) und Vertikalwindwerten ( $V_z$ ) auf Grundlage des RLMK/COSMO-DE wurden bereits in diesem Zusammenhang durch die Autoren durchgeführt. Erste Ergebnisse demonstrieren einen erfolgsversprechenden Ansatz.

Auf Grundlage von Pilotenmeldungen hat zudem das Mountain Wave-Projekt global über 200 empirische Rotorpositionen katalogisiert (Koordinaten, Vertikalgeschwindigkeiten, Rotorhöhe, Turbulenzklassifikation) und in einem Vektordatensatz zusammengefasst.

### 6.3 Gefährdung des Flugverkehrs durch Rotoren.

Wie bereits bei der Entdeckung der Rotoren als Teil des Leewellensystems durch Segelflieger festgestellt, ist die Luftströmung in Rotoren außerordentlich turbulent, besonders im Vergleich zur quasi laminaren ruhigen Strömung in den oberhalb gelegenen Wellen. Im PROMET-Artikel von DÖRNBRACK et al. wurde die Auswirkungen von Rotoren auf die zivile Luftfahrt am drastischen Beispiel eines Lufthansa Flugs nach Bilbao demonstriert. Hier kam es nicht nur zu Turbulenzen hinsichtlich der Vertikalbewegung sondern auch zu extremen horizontalen Windscherungen im Bereich von 20 bis 30 kn während des Landeanflugs welcher durch den Rotor erfolgte.

Zusammengefasst gibt es folgende Auswirkungen auf Luftfahrzeuge bei der Passage von Rotoren:

- Starke abrupte Geschwindigkeits- und Fluglageänderungen meist verbunden mit Windscherungswarnungen der Flugüberwachungssysteme,
- Richtungsstabilität und Rollmomente bei Starts und Landungen durch abrupte Windrichtungs- und Geschwindigkeitsänderungen (siehe Unfallbericht B737-500 auf dem Flughafen Denver; National Transportation Safety Board 2010),
- Reduzierung der Steiggeschwindigkeit beim Start, Gefahr markanter Abwinde beziehungsweise Hindernisberührung,
- die Windgeschwindigkeit am Boden kann in Verbindung durch Rotoren und Föhnsturm das zwei- bis dreifache der Windgeschwindigkeit gegenüber der Windgeschwindigkeit in Bergkammhöhe betragen (siehe Flugzwischenfall VC-10; BARREL 1987),
- durch die Turbulenzen ist die Ablesbarkeit der Instrumente im Cockpit stark eingeschränkt,
- bei Hubschraubern birgt die Gefahr des Einfluges in einen Rotor im Gebirge, dass die Auf- und Abwinde durch die Leistung nicht kompensiert werden kann. Zusätzlich ist ein Hubschrauber im Schwebzustand (Rettungseinsätze im Gebirge) sehr böenanfällig.

Die wirbelwalzenförmige Strömung produziert Auf- und Abwindgebiete mit Vertikalgeschwindigkeiten im Mittelgebirge bis maximal  $\pm 3$  m/s und im Hochgebirge von  $\pm 5-10$  m/s, in Extremfällen und orographischen begünstigten Regionen bis  $\pm 12-15$  m/s.

Allgemein besteht die Gefahr des Kontrollverlustes der Manövrierfähigkeit des Piloten bei Low Level-Flügen und die Gefahr der Bodenberührung (*flight into terrain*) bei der allgemeinen Luftfahrt und militärischen Flügen (Nickbewegungen beim taktischen Tiefflug). Zusätzlich wird bei Turbulenzereignissen beim Überschreiten der Betriebsgrenzen des Luftfahrzeuges eine aufwendige Wartungs- und Instandhaltungsprüfung (*maintenance check*) notwendig.

## 7 Ausblick

Schwerewellen in der oberen Atmosphäre und Rotoren im Bereich der Grenzschicht werden auch in Zukunft den Flugverkehr vor Herausforderungen stellen. Allerdings nimmt die Vorhersagbarkeit dieser Phänomene und damit deren Vermeidbarkeit aller Voraussicht nach in den nächsten Jahren zu. Dies liegt einerseits am verbesserten Verständnis von Schwerewellen und Rotoren durch zahlreiche Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet, wie zum Beispiel dem erwähnten Rotor-Experiment T-REX. Zum anderen verbessert sich die Auflösung der numerischen Wettervorhersagemodelle immer weiter, so dass die atmosphärischen Erscheinungen Schwerewellen und Rotoren demnächst direkt als skalige Prozesse vorhergesagt werden können. Dies ist teilweise schon heute beim DWD-Modell COSMO-DE der Fall. Bisherige empirische Ansätze in der Flugwetter-

beratung und Parametrisierungen in den Vorhersagemodellen, die zum Beispiel auf Kriterien wie kritischer Froude- oder Richardsonzahl beruhen, können dann durch direkte Auflösung von Schwerewellen und Rotoren in den Modellergebnissen zunehmend ersetzt werden.

## Literatur

- BARREL, G.R., 1987: In der Leewellenströmung- ein Zwischenfall mit einer Lehre. *Flugsicherheit*, Fachliche Mitteilung für fliegende Verbände der Bundeswehr **1**, 15-18.
- DOYLE, J.D., D.R.DURRAN, 2004: Recent developments in the theory of atmospheric rotors. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **85**, 337-442.
- DÖRNBRACK, A., R.HEISE, J.P.KÜTTNER, 2006: Wellen und Rotoren. *Promet* **32**, Heft 1/2, 18-24.
- DUMMANN, J., 2009: A report on glider-pilot activities to document leewave events in northern Germany and their aims. *Technical Soaring* **33**, 109-116.
- DURRAN, D.R., 2003: Lee waves and mountain waves. In: Holton, J.R., J.A.Curry. eds.; *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Elsevier Science, 1161-1169.
- GRUBISIC, V., und 14 Koautoren, 2008: The terrain-induced rotor experiment. A field campaign overview including observed highlights. *Bull.Amer.Meteorol.Soc.* **89**, 1513-1533.
- HAUF, T., T.L.CLARK, 1989: Three-dimensional numerical experiments on convectively forced atmospheric gravity waves. *Q.J.Royal.Meteorol.Soc.* **115**, 309-232
- HERTENSTEIN, R., 2011: Riding on air. Ridge, Wave and Convergence Lift. *Soaring Books and Supplies*, Minneapolis, USA, 103 pp.
- JIANG, D., J.D.DOYLE, 2004: Gravity wave breaking over the central ALPS: Role of complex terrain. *J.Atmos.Sci.* **61**, 2249-2266.
- KNIGGE, C., 2012: Untersuchungen von atmosphärischen Gebirgsrotoren mit Hilfe von Laborexperimenten und Grobstruktursimulationen. Dissertation, Fakultät Mathematik und Physik, *Leibniz Universität Hannover*, 155 Seiten.
- KÜHNLEIN, C., A. DÖRNBRACK, M. WEISSMANN, 2013: High resolution Doppler-Lidar observations of transient downslope flows and rotors. *Mon.Wea.Rev.* **141**, 3257-3272.
- KÜTTNER, J., 1939: Moazagotl und Föhnwelle. *Beitr. Phys. fr. Atmos.* **25**, 79-114.
- LANE, T.P., J.D.DOYLE, R.D.SHARMAN, M.A, SHAPIRO, C.D.WATSON, (2009): Statistics and dynamics of aircraft encounters of turbulence over Greenland. *Mon. Wea.Rev.* **137**, 2687-2702.
- LANE, T.P. und 4 Koautoren, 2012: Recent advances in the understanding of near cloud turbulence. *Bull. Amer.Meteorol.Soc.* **93**, 499-515.
- MASTELER, R., N.RENNO, 2005: The Froude Number as a Predictor of Mountain Lee Wave Phenomenon. *Technical Soaring* **29**, No 3., 78-88.
- NAPPO, C., 2012: Introduction to atmospheric gravity waves. Second Edition, Academic Press, London, 400 pp.
- NATIONAL AVIATION SAFETY DATA ANALYSIS CENTER, 2004: Review of Aviation Accidents Involving Weather Turbulence in the United States 1992-2001, NASDAC, 31 pp.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD, 2010: Runway Side Excursion during Attempted Take-off in Strong and Gusty Crosswind Conditions, B737-500, Denver, Colorado, Dec 20, 2008, NTSB/AAR-10/04.
- NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD, 2011: Review of U.S. Civil Aviation Accidents 2007-2009, NTSB/ARA-11/01, 58 pp.
- OSTIV, 2009: Weather forecasting for soaring flight. *WMO 1038*, World Meteorological Organization, Genf, 64 pp.
- RALPH, F.M., P.J.NEIMAN, 1997: Lidar Observations of a breaking mountain wave associated with extreme turbulence. *Geophys. Res. Letters* **24**, 663-666.
- SCHMAGER, G., 2012: Beobachtung interner Schwerewellen durch U34 – eine Auswertung aus ozeanographischer Sicht, Fortbildungsunterlage Abteilung Geoinformationswesen des Marinamtes der Bundeswehr.
- SCORER, R.S., 1949: Theory of waves in the lee of mountains. *Quart.J.R.Meteorol.Soc.* **75**, 41-56.
- SUTHERLAND, B.J., 2010: Atmospheric gravity waves. *Cambridge University Press*, Cambridge, 394 pp.
- VOSPER, S.B., 2004: Inversion effects on mountain lee waves. *Q.J.R.Meteorol.Soc.* **130**, 1723-1748.
- WHELAN, R.F., 2000: Exploring the monster. Mountain lee waves: The aerial elevator. *Wind Canyon Books*, Niceville, Florida, 196 pp.
- WOLFF, M.G., R.D.SHARMAN, 2008: Climatology of upper-level turbulence over the contiguous United States. *J.Appl.Meteor.Climatol.* **47**, 2198-2214.

C. FORSTER, A. TAFFERNER, H.-D. SAFFRAN

# 16 Gewittervorhersage

## Thunderstorm forecasting

### Zusammenfassung

Die Vorhersage von Gewittern ist immer noch eine Herausforderung für die moderne Meteorologie. Auch heute noch ist es schwierig, verlässliche Vorhersagen über Zeit und Ort der Entstehung, die Zugbahn, und begleitende Wettererscheinungen wie die Art des Niederschlags, das Vorkommen von Blitzen und die durch das Gewitter hervorgerufene Windstärke zu machen. Dieser Artikel beschreibt anhand von anschaulichen Beispielen, wie die Meteorologie diese Probleme angeht und wie integrierte Vorhersagesysteme erfolgreich dazu genutzt werden, die Gewittervorhersage zu verbessern und den Vorhersagehorizont von Gewittern erheblich zu verlängern.

### Summary

The forecast of thunderstorms is still a challenge for meteorologists. Even to date, it is difficult to provide reliable forecasts on the time and location of development and the track, and about concurring weather phenomena like e.g. the type of precipitation, the occurrence of lightning and the intensity of accompanying winds. This article gives some illustrative examples on how the problems are tackled and how integrated forecasting systems, in particular, can be successful in improving thunderstorm forecasts and extending the forecast horizon of thunderstorms considerably.

### 1 Einleitung

Kommt in den nächsten Stunden ein Gewitter oder nicht? Wie stark wird es werden und wo genau wird es auftreten und hinziehen? Im Frühjahr und Sommer stellen sich diese Fragen Flughafenbetreiber, Flugsicherung, Airlines und Piloten, aber auch Bergsportler, Organisatoren von Freiluft- oder Sportveranstaltungen, Bauern, Hochwasserschutz, Warndienste und viele andere, deren Aktivitäten und Entscheidungen vom Auftreten und Eintreffen eines Gewitters abhängen. Genaue und verlässliche Gewittervorhersagen für eine Zeitspanne von mehreren Stunden, in der Meteorologie auch Nowcasting genannt, sind besonders wichtig für den Luftverkehr, da die mit Gewittern verbundenen Phänomene wie Hagel, Turbulenz, Blitzschlag und Vereisung eine erhebliche Gefahr für Flugzeuge darstellen (GERZ und SCHUMANN 2013, GERZ et al. 2012a, GERZ et al. 2012b). Flugzeuge weichen Gewittern daher aus. Auch die Betriebsabläufe an Flughäfen werden bei Durchzug eines Gewitters erheblich behindert. Die Arbeiten auf dem Vorfeld müssen aufgrund der Gefahr von Blitzschlag solange eingestellt werden, bis das Gewitter abgezogen ist. Leider sind die

Zugbahn, die Intensität, das Wachstum und der Zerfall von Gewittern schwierig vorherzusagen. Obwohl durch die Nutzung moderner Technologien wie Radar- und Satellitenmessungen viele Ereignisse während der letzten 25 Jahre beobachtet und untersucht werden konnten, gleicht keines dieser Ereignisse im Detail dem anderen, was es unmöglich macht, die Entwicklung eines zukünftigen Gewitters aus der eines vergangenen vorherzusagen. In den letzten Jahren sind einige Technologien entwickelt worden, die bei der Verfolgung Vorhersage von bereits existierenden Gewitterzellen bis zu etwa einer Stunde recht erfolgreich sind (siehe Abschnitt 2.2). Dagegen ist die Entstehung einer neuen Gewitterzelle beziehungsweise die Diagnose und die Vorhersage der Prozesse, die ein Gewitter entstehen lassen, immer noch eine große Herausforderung (zum Beispiel WILSON et al. 2004). Vor kurzem neu entwickelte Technologien liefern jedoch vielversprechende Ergebnisse (siehe Abschnitt 2.4.).

Der Münchener Hagelsturm vom 12. Juli 1984 (Abb. 16-1), der einen wirtschaftlichen Schaden von etwa 2 Milliarden DM verursachte, konnte bis zu seiner Entstehung nahe des Bodensees zurückverfolgt werden. Anhand ei-



Abb. 16-1: Fotografie einer Gewitterwolke über dem nördlichen Voralpenland am 12. Juli 1984, aufgenommen um 17 UTC von F. D. Oltmans (Pilot) aus einem Flugzeug in 10 600 m Höhe. Nach Abschätzungen des Piloten basierend auf dem On-Board-Wetterradar war die Wolke war ungefähr 12 km hoch, ihr Amboss etwa 100 km breit und der Durchmesser des Starkniederschlagsgebietes etwa 40 km breit. Über dem flachen Amboss ist eine überschießende Wolke erkennbar (TAFERNER und FORSTER 2012).

ner Analyse von allen über ein solches Ereignis verfügbaren meteorologischen Daten können Meteorologen das Ereignis im Nachhinein bis ins Detail genau analysieren (HEIMANN und KURZ 1985). Die Beantwortung der Frage, ob jedoch eine schnell wachsende Cumuluswolke an einem heißen Sommertag in derselben Region zu einem mit dem Münchener Hagelsturm vergleichbaren Unwetter oder ob sie zu einem durchschnittlichen Gewitter werden wird, ist für die Meteorologie bis heute eine Herausforderung. Die Schwierigkeiten, eine solche Vorhersage zu machen, sind vielfältig. Einerseits entstehen extreme Wetterereignisse durch ein kompliziertes Zusammenspiel verschiedener Faktoren: lokale Gegebenheiten wie Feuchte, solare Einstrahlung und Hebung durch Orographie wechselwirken mit den großskaligen meteorologischen Umgebungsbedingungen, die einen entsprechend labilen Zustand wiedergeben müssen, damit Gewitter entstehen können. Andererseits treten Gewitter in vielen verschiedenen Formen und Größen auf, die von einzelnen kleinskaligen Zellen mit einem Durchmesser von etwa 2 km bis hin zu Gewitterkomplexen mit 100 km Durchmesser reichen. Auch ihre Lebensdauer variiert zwischen etwa 20 Minuten für einzelne Gewitterzellen bis hin zu mehreren Stunden im Falle von frontalen Gewitterlinien. Schließlich wachsen Gewitterzellen nicht linear und kontinuierlich, sondern entstehen plötzlich, nachdem ein bestimmter Schwellenwert in der Labilität der Luftmasse überschritten ist. Nach Überschreiten des Schwellenwertes setzen Niederschlagsprozesse ein, die die Dynamik der Gewitterzelle und damit wiederum die großskalige Umgebung beeinflussen. In Abbildung 16-1 kann man das Überschießen einer Wolke über dem flachen Gewitteramboss erkennen, was ein Hinweis auf heftige Aufwinde ist, die bis in die Stratosphäre hinein reichen. Solch heftige Aufwinde sind meist mit Hagel verbunden. In diesem Fall wurden Hagelkörner mit bis zu 9 cm Durchmesser beobachtet, die Todesopfer forderten,

Hausdächer und Autos zerstörten und zu schweren landwirtschaftlichen Schäden führten. Abbildung 16-2 zeigt das Foto eines Hagelkorns mit 5 cm Durchmesser, das am DLR Institut für Physik der Atmosphäre (IPA) gefunden worden ist. Offensichtlich wechselwirkten die großskalige Umgebung und die lokalen Gegebenheiten in einer Art und Weise, dass ein dermaßen außergewöhnlich heftiges Unwetter entstehen konnte (Details siehe HEIMANN und KURZ 1985, HÖLLER und REINHARDT 1986).

Angesichts der komplexen Aufgabe, die das Nowcasting von Gewittern erfüllen muss, kann man von folgender Definition von CONWAY (1998) ausgehen: „Das Nowcasting ist die Vorhersage über einen Zeitraum von der Gegenwart bis hin zu mehreren Stunden erstellt durch eine beliebige Methode unter Berücksichtigung von lokalen Details; dies schließt eine detaillierte Beschreibung des gegenwärtigen Wetters mit ein.“ Letzteres kann durch die Nutzung von allen verfügbaren Beobachtungen wie zum Beispiel Blitzmessungen und Fernerkundungsdaten von Radar und Satellit realisiert werden (cf. BROWNING 1982). Heutzutage umfasst der Begriff „Nowcasting“ Extrapolationsmethoden, statistische und heuristische Methoden sowie numerische Wettervorhersage (NWP). Als heuristische Methoden werden dabei Vorhersageregeln bezeichnet, die auf Experimenten, Theorie, numerischer Simulation, Expertensystemen, unscharfer Logik und Daumenregeln basieren (COST 722, 2004).

Nach diesen Definitionen wird deutlich, dass es keine strikte Unterscheidung zwischen Nowcasting und Kurzfristvorhersage gibt. Im Großen und Ganzen kann man sagen, dass das Nowcasting die Extrapolation von beob-



Abb. 16-2: Querschnitt durch ein Hagelkorn mit 5 cm Durchmesser, das am DLR IPA nach dem Unwetter vom 12. Juli 1984 gefunden wurde (Foto: A. Waldvogel, ETH Zürich).

achteten Wetterphänomenen in die Zukunft bezeichnet, während mit der Kurzfristvorhersage die Vorhersage basierend auf einem numerischen Modell gemeint ist. Bei Gewittern umfasst das Nowcasting dabei eine Zeitspanne von der Gegenwart bis zu einer Stunde, die Kurzfristvorhersage eine Zeitspanne bis zu 6 Stunden in die Zukunft. Das ist auch genau der Vorhersagezeitraum, der für die strategische und taktische Flugplanung in der Luftfahrt relevant ist. Es ist offensichtlich, dass eine erfolgreiche Vorhersage eines Wetterphänomens am besten durch eine Kombination verschiedener Datenquellen und Algorithmen erstellt werden kann, um die Komplexität des Wetterphänomens möglichst vollständig zu erfassen (TAFFERNER et al. 2008). Abhängig von der erforderlichen Vorhersagezeit kann dabei ein NWP zur Kurzfristvorhersage beitragen.

Abbildung 16-3 veranschaulicht die Situation. Reine Extrapolation kann eine schnell sich entwickelnde Wettersituation, insbesondere dessen kleinskalige Entwicklung, nicht erfassen. Deshalb nimmt die Genauigkeit des Nowcastings innerhalb der ersten Stunde schnell ab. Das liegt unter anderem daran, dass Gewitter eine typische Lebensdauer von nur einer halben Stunde haben. Hochauflösende NWP-Modelle mit einer Auflösung von 1 km oder weniger können in Kombination mit Datenassimilation die Entwicklung von Gewittern simulieren. Diese Modelle können die Vorhersagegenauigkeit über eine Stunde hinaus erweitern und damit die Lücke zwischen der reinen Extrapolation und großskaliger Modellierung schließen. Für den Zeithorizont bis zu einer Stunde sind Extrapolationsmethoden geeigneter als hochauflösende Modelle, da jene eine Vorlaufzeit brauchen, um die Beobachtungsdaten zu prozessieren, zu assimilieren, und schließlich eine Vorhersage zu erstellen. Expertensysteme dagegen sind sowohl für das Nowcasting als auch für die Kurzfristvorhersage geeignet, da sie Beobachtungen, Nowcasting und NWP-Modellvorhersagen mittels technisch ausgefeilter Methoden kombinieren. In den folgenden Abschnitten wird dies anhand von Beispielen erläutert.

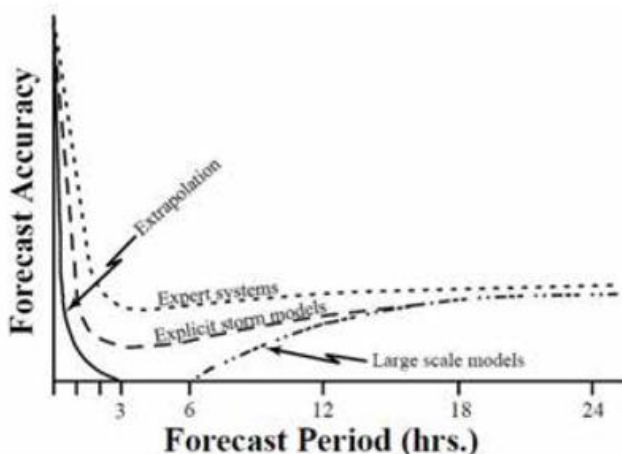


Abb. 16-3: Qualitative Darstellung der Vorhersagegenauigkeit als Funktion des Vorhersagezeitraums für konvektiven Niederschlag auf einer räumlichen Skala von wenigen Kilometern (WILSON et al. 1998).

## 2 Nowcasting-Methoden

In der Meteorologie werden verschiedene Nowcasting-Methoden unterschieden:

- konzeptionelle Modelle,
- Extrapolation,
- numerische Vorhersage und
- Vorhersage von Entstehung und Zerfall.

### 2.1 Konzeptionelle Modelle

Um ein Wetterereignis genau zu untersuchen ist es in der Meteorologie üblich, vergangene Beobachtungen zu analysieren, Kampagnen mit speziellen Beobachtungsinstrumenten durchzuführen und das Ereignis numerisch zu simulieren. Mit Hilfe von thermodynamischen Grundregeln ist es dann möglich, konzeptionelle Modelle des Lebenszyklus von Ereignissen zu entwickeln (BROWNING 1982). Ein Meteorologe kann dann mittels eines konzeptionellen Modells und der aktuellen Beobachtungen die kurzfristige Entwicklung eines Wetterereignisses abschätzen.

### 2.2 Extrapolation

Extrapolation ist nur sinnvoll, wenn sich ein Wetterereignis bereits entwickelt hat; in diesem Fall kann die Änderung mit der Zeit dazu genutzt werden, um die zukünftige Entwicklung abzuschätzen. Sie kann zum Beispiel durch die Betrachtung einer Sequenz von Radarbildern durchgeführt werden. Fügt man die Radarbilder per Auge zu einer Animation zusammen, kann man die zeitliche Entwicklung der in den Bildern sichtbaren Niederschlagsmuster in die nahe Zukunft extrapolieren. Dieses Vorgehen kann allerdings auch durch einen Algorithmus automatisiert werden. Beim Deutschen Wetterdienst (DWD) wurden solche Verfahren entwickelt, um basierend auf Radardaten Gewitter beziehungsweise Starkniederschlagszellen automatisch zu detektieren und kurzfristig vorherzusagen. Dazu gehören KONRAD (LANG et al. 2003), CellMOS (WALTER et al. 2009) und RADVOR-OP (WEIGL et al. 2005). Die Abschätzung der zukünftigen Verlagerung der detektierten Muster basiert bei KONRAD beispielsweise auf der linearen Extrapolation der Zugbahn der detektierten Zellzentroide über die letzten 10 Minuten. Andere Verfahren korrelieren bestimmte Muster in den einzelnen aufeinanderfolgenden Bildern zueinander und berechnen basierend auf der Korrelation die zukünftigen Positionen der Muster. Am DLR-IPA wurde ein solcher Algorithmus, der sogenannte *Pyramidal Image Matcher* entwickelt, der zeitlich aufeinander folgende Bilder schrittweise von der groben bis zur feinen Skala ineinander überführt und für jedes Bildpixel einen Verschiebungsvektor berechnet (ZINNER et al. 2008, ZINNER et al. 2013). Durch diese Methode wird nicht nur die Verschiebung eines Musters berücksichtigt, sondern auch dessen Größen- und Formänderung.

Der *Pyramidal Image Matcher* kann für das Tracking und Nowcasting von Gewittern in Radar- und Satelliten-

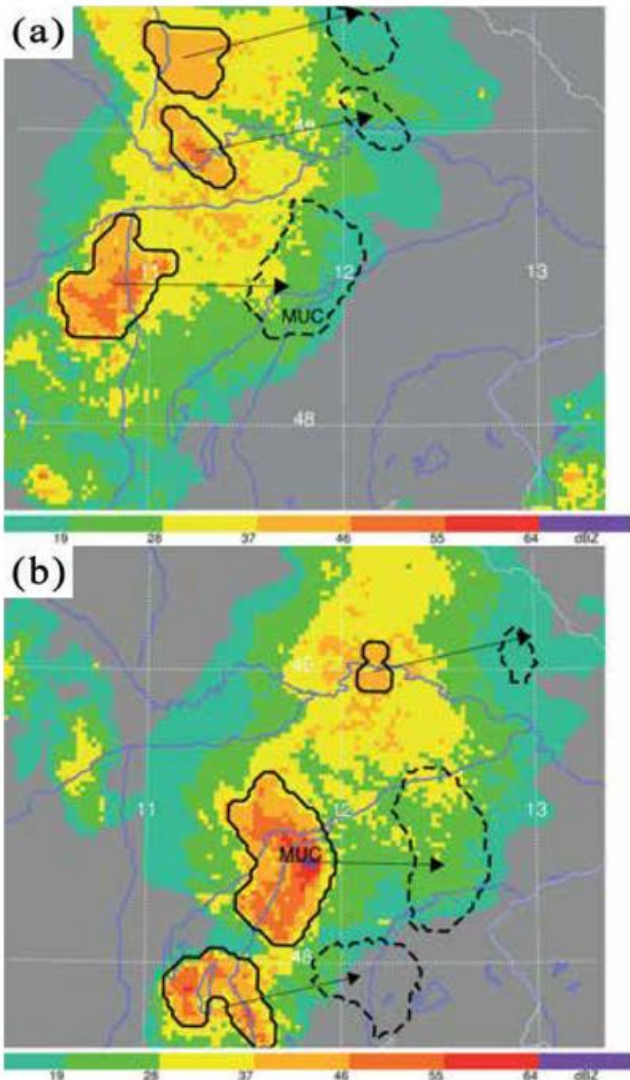


Abb. 16-4: Rad-TRAM Nowcasting-Beispiel für eine Region mit etwa 300 km x 300 km um den Flughafen München (MUC) am 21. Mai 2009 um (a) 16:15 UTC und (b) 17:15 UTC. Flüsse sind blau eingezeichnet. Auf dem Radarbild (farbiger Hintergrund) sind Rad-TRAM Gewitterzellen durch schwarze Konturen gekennzeichnet, deren 60 Minuten-Vorhersage durch gestrichelte Konturen. Die Pfeile zeigen die Bewegungsrichtung der Zellschwerpunkte an (TAFFERNER und FORSTER, 2012).

daten verwendet werden. Als Beispiel zeigt Abbildung 16-4 eine Gewittervorhersage für den Flughafen München (MUC) am 21. Mai 2009 mit Hilfe des DLR-Rad-TRAM (Radar Tracking and Monitoring)-Algorithmus (KOBBER und TAFFERNER 2009). Rad-TRAM detektiert Starkniederschlagszellen mit einer Reflektivität  $> 37$  dBZ und sagt deren Verlagerung und Entwicklung mit Hilfe des „Pyramidal Image Matchers“ bis zu einer Stunde vorher. Zellen mit dem Schwellenwert von 37 dBZ stimmen sehr oft mit Gebieten mit hoher Blitzaktivität überein und werden von Piloten erfahrungsgemäß möglichst umflogen. Die Detektion und das Nowcasting von Rad-TRAM sind besonders nützlich für den An- und Abflugbereich an Flughäfen. Im Beispiel (Abb. 16-4a) kann man drei Zellen markiert als schwarze Konturen über dem Radarbild erkennen. Ihre einstündige Vorhersage und die Bewegungsrichtung der Zellen sind durch gestrichelte Konturen und Pfeile gekenn-

zeichnet. Eine dieser Vorhersagen zeigt, dass MUC von einer Gewitterzelle getroffen werden wird. Die Analyse eine Stunde später (Abb. 16-4b) bestätigt dies, wobei die Gewitterzelle in Position und Größe recht gut mit der Vorhersage übereinstimmt. In MUC kam es zu dieser Zeit zu Behinderungen und Flugausfällen, da aufgrund der Blitzschlaggefahr die Arbeiten auf dem Vorfeld eingestellt werden mussten. So eine Vorhersage kann der Flugsicherung und den Flughäfen jedoch ermöglichen, rechtzeitig die Flüge zu regulieren und damit Verspätungen und Ausfälle so gut wie möglich zu vermeiden.

Der automatische Tracking- und Nowcasting-Algorithmus Cb-TRAM (*Cumulonimbus Tracking and Monitoring*) nutzt METEOSAT SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager*)-Daten, um Gewitterwolken von oben zu detektieren und wiederum mit Hilfe der Pyramidal Image Matchers bis zu einer Stunde vorherzusagen (ZINNER et al. 2008, ZINNER et al. 2013). Durch Kombination verschiedener METEOSAT-Kanäle können drei verschiedene Entwicklungsstadien von Gewittern erkannt werden: erstes Wachstum von Cumuluswolken, rasche vertikale Entwicklung, und reife Gewitterzellen, die bis oder über die Tropopause hinaus reichen. Cb-TRAM ist besonders nützlich für den Enroute-Flugverkehr, speziell in Regionen, in denen keine anderen Daten zur Gewitterbeobachtung zur Verfügung stehen wie zum Beispiel über Ozeanen.

Abbildung 16-5 zeigt eine Cb-TRAM-Analyse für einen Flugunfall am 1. Oktober 2009, als ein Airbus A319 auf seinem Weg von Forli nach Palermo beim Landeanflug in eine Gewitterzelle geraten und dabei dessen Radom durch Hagel erheblich beschädigt worden ist (Abb. 16-6). Cb-TRAM prognostiziert, dass die Gewitterzelle an der Nordküste Siziliens Richtung Osten wandern und die Flugroute des A319 kreuzen wird. Wäre dem Piloten diese Information in Echtzeit vor seinem Anflug auf Palermo zur Verfügung gestanden, hätte er einen Überblick über die Wettersituation gehabt und die Gefahren beim Landeanflug besser einschätzen können.

Sowohl Rad-TRAM als auch Cb-TRAM wurden während dreier Sommerkampagnen von 2010 bis 2012 in Echtzeit in MUC erfolgreich getestet und bewertet (FORSTER und TAFFERNER 2012). Die Analysen und Vorhersagen aus den Algorithmen standen den Nutzern bei der Deutschen Flugsicherung, der Flughafen München Gesellschaft und dem Lufthansa Hub Control Center in deren gewohnten Displays zur Verfügung. Dadurch, dass alle Flugverkehrsbetreiber gleichzeitig dieselbe Information über die Gewittersituation hatten, konnten Entscheidungen schneller getroffen und damit Betriebsabläufe optimiert werden. Im Herbst 2012 wurden Cb-TRAM- und Rad-TRAM-Daten im Rahmen einer Kooperation zwischen Lufthansa und DLR-IPA auch ins Cockpit von Verkehrsflugzeugen gelinkt. Erste Tests zeigen bereits, wie nützlich die Informationen für Piloten sind.

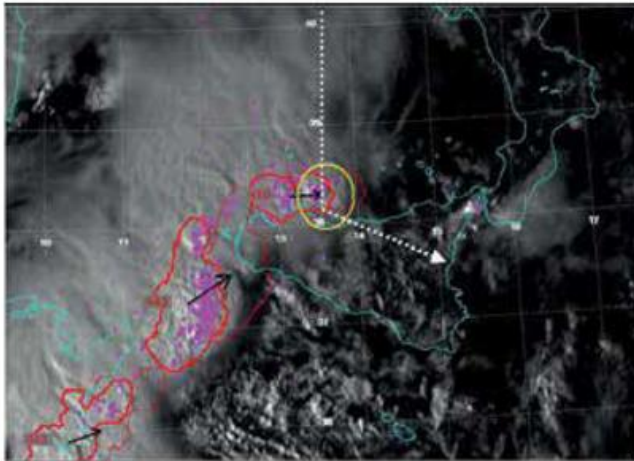


Abb. 16-5: Cb-TRAM Nowcasting-Beispiel, das ein hochaufgelöstes METEOSAT-Bild im sichtbaren Bereich mit detektierten (rote Konturen) und vorhergesagten (dünne rote Konturen) Cb-TRAM-Zellen zeigt. Die gestrichelte weiße Linie zeigt die ungefähre Flugroute des Airbus A319 am 1. Oktober 2009 auf seinem Weg von Forlì (Norditalien) nach Palermo und schließlich weiter nach Catania. Die Region, in der das Flugzeug in eine Hagelzelle geraten war, ist mit einem gelben Kreis gekennzeichnet. Blitzentladungen sind durch magentafarbene Kreuze markiert (TAFERNER et al. 2010).

### 2.3 Numerische Vorhersage

Numerische Simulationen mit hoher Auflösung haben den Vorteil, dass alle physikalischen Prozesse, die für ein Wetterphänomen relevant sind, berücksichtigt werden. Dies gilt zum Beispiel für turbulente Durchmischung in der Grenzschicht, Wolken- und Niederschlagsprozesse, sowie Strahlung und Advektion. Abbildung 16-7 zeigt das Ergebnis einer Simulation einer Gewitterfront im Alpenvorland mit dem MM5-Modell. Die 3-D-Darstellung der Hydrometeore zeigt deutlich die konvektiven Zellen, insbesondere das Gewitter am Alpenrand, das auch zu dieser Zeit und an diesem Ort beobachtet wurde. Man kann deutlich die ambossartige Struktur in der Wolkenverteilung erkennen. Im Windfeld bei etwa 800 m Meereshöhe (etwa 200 m über Grund)



Abb. 16-6: Hagelschaden am Radom des Airbus A319, der am 1. Oktober 2009 auf dem Flug von Forlì nach Palermo in eine Hagelzelle geraten war (Foto: ATRDRIVER).

den konvektiven Zellen zu sehen. Obwohl es viele so erfolgreiche Simulationen wie diese gibt, kommt es, wie in der Einleitung bereits erwähnt, ebenso häufig vor, dass mesoskalige Wetterphänomene mit einer Ausdehnung von 10 bis 100 km überhaupt nicht oder zur falschen Zeit oder am falschen Ort vorhergesagt werden. Eine weitere Herausforderung ist es, den Lebenszyklus solcher Wetterphänomene (Entstehung, Entwick-

lung inklusive der richtigen Intensität und Zerfall) zu erfassen. Trotzdem sind hochauflösende numerische Simulationen sinnvoll und hilfreich. Anstatt zu verlangen, dass jedes Detail eines Gewitters korrekt vorhergesagt wird, können abgeleitete Größen wie zum Beispiel Gebiete mit konvektiven Niederschlag über einem gewissen Schwellenwert oder Gewitterindizes Hinweise darauf geben, wo und wann ein Gewitter mit hoher Wahrscheinlichkeit auftreten wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung einer Vielzahl von Vorhersagen, eines sogenannten Ensembles, die sich durch gestörte Anfangs- oder Randbedingungen oder in der Modellphysik unterscheiden. Das Ziel dabei ist, eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auftreten eines Wetterphänomens zu erhalten. Auch zeitlich versetzte Ensembles aus Modellläufen, die zu verschiedenen Analysezeiten gestartet werden, können eine solche Wahrscheinlichkeitsverteilung erzeugen. Ein Beispiel ist das COSMO-MUC-Ensemble des DLR-IPA. COSMO-MUC ist eine Version des COSMO-DE (BALDAUF et al. 2011) für den MUC-Nahbereich, das jede Stunde neu gestartet wird und 21 Stunden-Vorhersagen liefert. Durch die stündlichen Neustarts können lokale Daten wie AMDAR (*Aircraft Meteorological Data Relay*) oder Radardaten öfter assimiliert und auf diese Weise die Vorhersagen verbessert werden (DENGLER et al. 2011).

### 2.4 Vorhersage von Entstehung/Zerfall

Die Vorhersage der Entstehung eines Gewitters ist sehr schwierig, da Gewitter wie bereits erwähnt nicht langsam

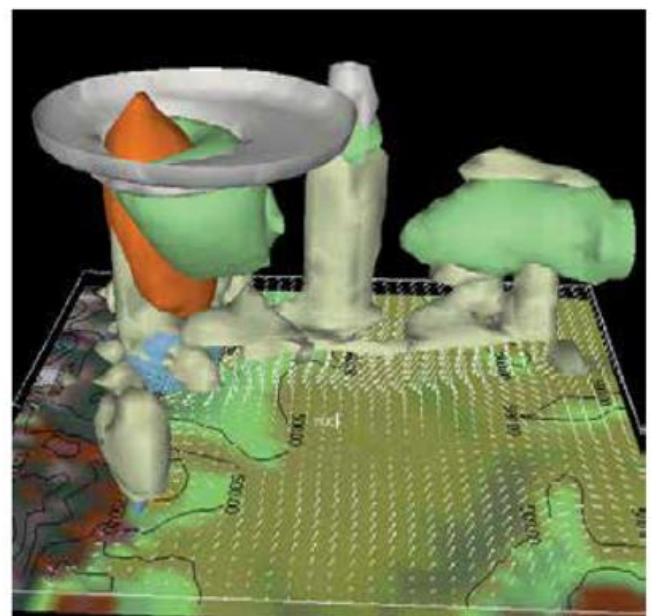


Abb. 16-7: Numerische Simulation einer Gewitterlinie, die am 12. August 2004 über das Alpenvorland zog. Dargestellt ist die dreidimensionale Hydrometeorverteilung aus einem Blickwinkel von Ost nach West um 19 UTC. Die Alpen befinden sich auf der linken Seite, MUC im Zentrum der Grafik. Der Ausschnitt des dargestellten Gebietes ist ungefähr 250 km x 250 km groß. Verschiedene Farben in den konvektiven Zellen unterscheiden verschiedene Hydrometeore: Regen (blau), Wolkenröpfchen (weiß), Graupel (orange), Schnee (grün), Eiswolken (grau). Die Pfeile repräsentieren das Windfeld in 800 m Meereshöhe (TAFERNER et al. 2008).

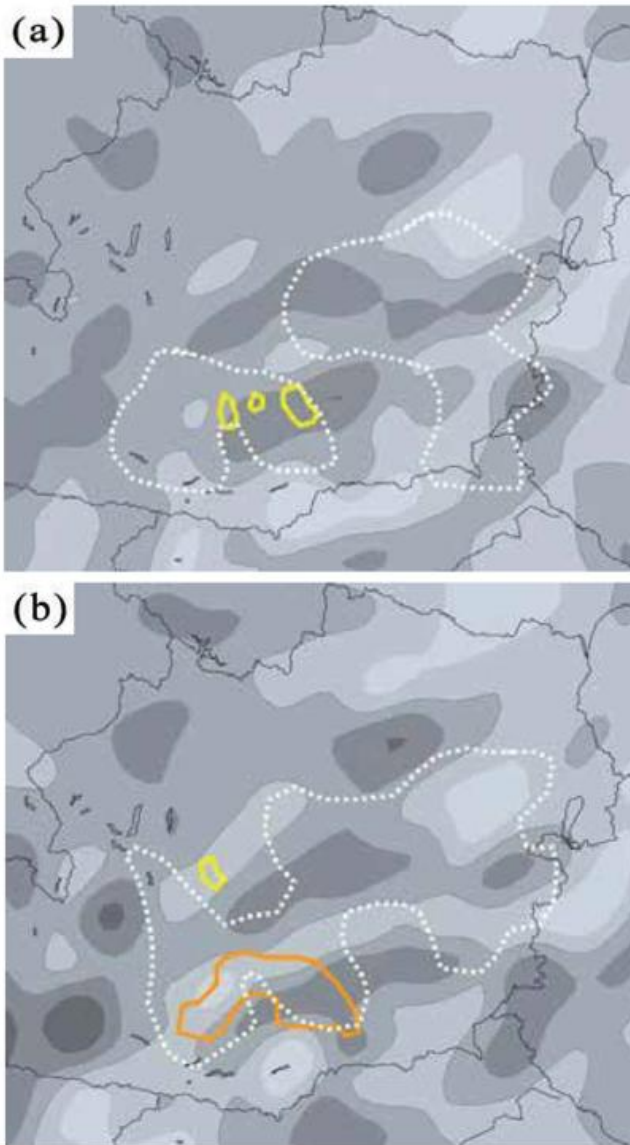


Abb. 16-8: Erste konvektive Entwicklung über dem Osten von Österreich am 25. Mai 2009 um (a) 11 UTC und (b) 12 UTC. Vorhersage der Aufwinde in 500 hPa aus dem COSMO-EU sind grau schattiert (je dunkler, je stärker). Weißgestrichelte Konturen markieren Gebiete mit Feuchtekonvergenz am Boden aus der VERA-Analyse. Gelbe und orange Konturen stellen erste schnelle Entwicklung beziehungsweise rasches vertikales Wachstum konvektiver Wolken aus Cb-TRAM dar (TAFERNER und FORSTER 2012).

und stetig wachsen, sondern plötzlich durch Überschreiten eines Schwellenwertes ausgelöst werden. Eine kleine Cumuluswolke kann innerhalb von 10 Minuten zu einem reifen Gewitter wachsen. Dabei können viele verschiedene Prozesse eine Rolle spielen, zum Beispiel Orografie beziehungsweise orografisch bedingte Konvergenz, präfrontale, synoptisch bedingte Hebung, Schwerewellen, lokale bodennahe Temperaturmaxima oder Auslösung durch eine bereits existierende Gewitterzelle, die teilweise auch in Kombination mit einander auftreten. Es ist daher sinnvoll, nicht nur eine Datenquelle zu betrachten, um die Entstehung eines Gewitters vorherzusagen, sondern mehrere wie zum Beispiel Satellitendaten, Radardaten, lokale Beobachtungen, und numerische Vorhersagen. Das Beispiel in Abbildung 14-8 zeigt wie aus verschie-

denen Datenquellen der wahrscheinliche Entstehungsort eines Gewitters vorhergesagt werden kann. Die Bodenanalyse aus dem VERA-System (Vienna Enhanced Resoluten Analysis System, STEINACKER et al. 1997) zeigt Feuchtekonvergenz an derselben Stelle, wo Cb-TRAM erstes Wachstum einer Cumuluswolke detektiert (Abb. 16-8 a). Gleichzeitig wird im COSMO-Modell Hebung vorhergesagt, und das Profil der äquivalentpotentiellen Temperatur ist feuchtilabil. All dies deutet darauf hin, dass an dieser Stelle mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Gewitter entstehen wird. Eine Stunde später (Abb. 16-8 b) detektiert Cb-TRAM dort eine vertikal rasch wachsende Zelle, die sich dann in ein reifes Gewitter weiterentwickelt. Am IPA wird zur Zeit ein Algorithmus entwickelt, der die Kombination von verschiedenen Datenquellen zum Nowcasting der Gewitterentstehung automatisiert (STICH et al. 2011). Auch der Zerfall von Gewittern kann durch Kombination verschiedener Datenquellen und eines Lebenszyklusmodells besser vorhergesagt werden (BRETL 2010).

### 3 Integrierte Systeme für das Nowcasting und die Kurzfristvorhersage

Die beschriebenen Nowcasting-Methoden wurden alle voneinander unabhängig für bestimmte Zwecke entwickelt. Die Kombination all dieser Methoden in einem integrierten System bringt jedoch weitere Vorteile für das Monitoring und das Nowcasting. Ein integriertes System kann die Ergebnisse der einzelnen Methoden verarbeiten und miteinander vergleichen, zum Beispiel im Hinblick auf die exakte Position, die Intensität und die Zugbahn eines Gewitters. Damit kann ein Gewitter zuverlässiger vorhergesagt werden, als mit nur einer einzigen Datenquelle alleine (TAFERNER et al. 2008). Ein integriertes System muss natürlich in einer Weise konstruiert sein, dass große Datenmengen innerhalb einer kurzen Zeit verarbeitet werden können, um möglichst zeitnah verlässliche Vorhersagen liefern zu können. Die Hauptaufgabe eines solchen Systems ist die Reduktion der Komplexität eines Wetterphänomens, so dass zum Beispiel Nutzer in der Luftfahrt, die keine ausgebildeten Meteorologen sind, die Ausgabe des integrierten Systems schnell verstehen und so zu schnellen Entscheidungen kommen können. Dies ist besonders wichtig bei Gewittern, da Gewitter sich schnell ändern und dem Nutzer nicht viel Zeit lassen, komplexe Informationen zu interpretieren. In den letzten Jahren sind verschiedene integrierte Systeme entwickelt worden, die einfach zu verstehende Wetterinformationen, zugeschnitten auf die Bedürfnisse der Nutzer liefern. Beispiele sind das ITWS (Integrated Terminal Weather System) des Massachusetts Institute of Technology (EVANS und DUCOT 1994) und das Auto-Nowcast-System (ANC) des National Center for Atmospheric Research (NCAR, MUELLER et al. 2003).

Am DLR-IPA wird zur Zeit das integrierte System WxFUSION (Weather Forecast user-Oriented System Including Object Nowcasting) entwickelt (FORSTER und TAFERNER

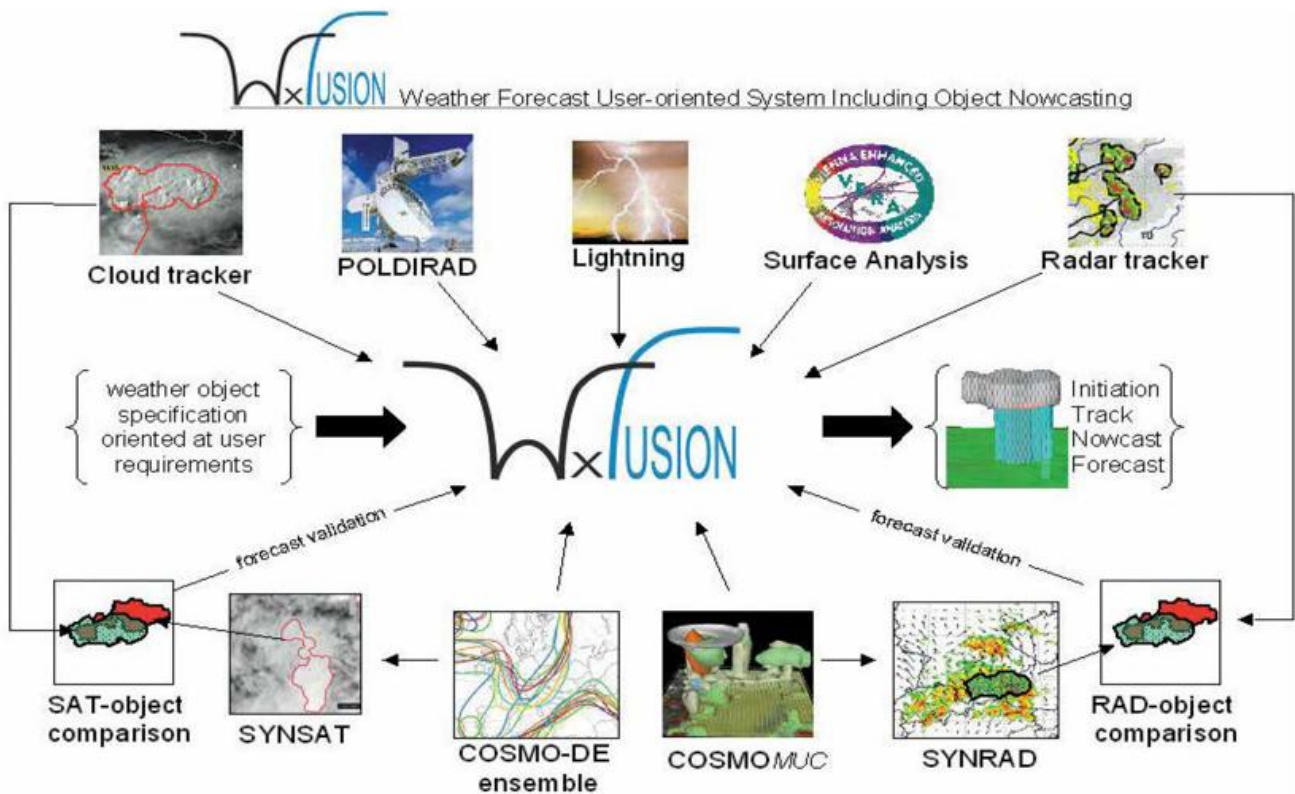


Abb. 16-9: Schematische Darstellung des integrierten Systems WxFUSION. Beobachtungsdaten und Nowcasting-Algorithmen (Elemente in der oberen Reihe) werden mit Daten aus numerischen Simulationen (Elemente in der unteren Reihe) verbunden, um ein vorher spezifiziertes Wetterobjekt zu analysieren, zu verfolgen und vorherzusagen (nach TAFFERNER et al., 2008, und FORSTER und TAFFERNER, 2009).

NER 2009). Ziel des Systems ist die Kombination verschiedener Daten aus Beobachtungen, Nowcasting-Algorithmen und Modellvorhersagen, um den momentanen und zukünftigen Zustand eines Wetterphänomens möglichst gut zu erfassen. Insbesondere werden Nowcasting-Daten mit Vorhersagedaten aus Modellen kombiniert, um die Lücke im Übergang zwischen Nowcasting und Vorhersage zu schließen.

Abbildung 16-9 zeigt das Konzept des Systems, wobei die verschiedenen Datenquellen und Systemkomponenten durch Symbole gekennzeichnet sind. In der oberen Reihe sind Nowcasting-Methoden und Beobachtungsdaten dargestellt. Dazu gehören die bereits erwähnten Algorithmen Cb-TRAM und Rad-TRAM sowie das VERA-System. Zusätzlich sind Daten vom polarimetrischen Radar des DLR (POLDIRAD) und Blitzdaten aus dem LINET-Netzwerk der Firma nowcast GmbH verfügbar (BETZ et al. 2009, BETZ et al. 2008). Die untere Reihe umfasst numerische Modellvorhersagen und Komponenten zur Verifikation der Vorhersagen (*object comparison*). Verfügbar sind Vorhersagen aus dem COSMO-DE und aus dem hochauflösenden COSMO-MUC-Ensemble. Aus diesen Modellen können synthetische Satelliten- und Radarbilder (SYNSAT und SYRAD) abgeleitet werden, die dann wiederum dazu genutzt werden können, um mit Cb-TRAM und Rad-TRAM synthetische Gewitterzellen zu erzeugen. Ein Vergleich der synthetischen Gewitterzellen mit den tatsächlich beobachteten ermöglicht es, aus einem Ensemble von Vorhersagen die beste ausfindig zu machen. Diese kann dann für die

Kombination mit den Nowcasting und Beobachtungsdaten verwendet werden.

Als weitere Eingangsgröße für WxFUSION muss eine vom Nutzer vorgegebene Objektspezifikation des Wetterphänomens zur Verfügung gestellt werden. Wie bereits erwähnt brauchen zum Beispiel Nutzer im Luftverkehr einfache, reduzierte Darstellungen eines Gewitters, um die Ausgabe des Systems leicht verstehen und interpretieren zu können. Abbildung 16-10 zeigt wie die Reduktion der Komplexität eines Wetterphänomens realisiert werden kann. Auf der linken Seite sind zwei Fotografien eines Gewitters übereinander kombiniert, um die typischen Phänomene in einem Gewitter in einem Bild zu verdeutlichen. Im oberen Teil sieht man die amboßartig ausgebildete Wolke, wie sie für reife Gewitter typisch ist. Davor entwickelt sich eine neue konvektive Wolke. Im unteren Teil erkennt man eine Böenwalze, die durch ein Zusammenspiel des Ansaugens von feuchter Luft in das Gewitter und dem durch verdunstenden Niederschlag (dahinter sichtbar) angetriebenen Kaltluftausfluss entsteht. Unter Verwendung von Cb-TRAM und Rad-TRAM, die den oberen beziehungsweise den unteren Teil des Gewitters detektieren, kann nun ein Gewitterobjekt konstruiert werden wie im rechten Bild dargestellt. Zusätzlich ist noch ein Bodenobjekt abgebildet, das die Böenlinie vor dem Gewitter kennzeichnen soll. Die Information für den Nutzer erfolgt dann in Form solcher Objekte, die aus Polygonen mit einer Ober- und Untergrenze und einiger das Gewitter charakterisierender Parameter wie Zugrichtung, Zuggeschwindigkeit, Intensität und Trend besteht.

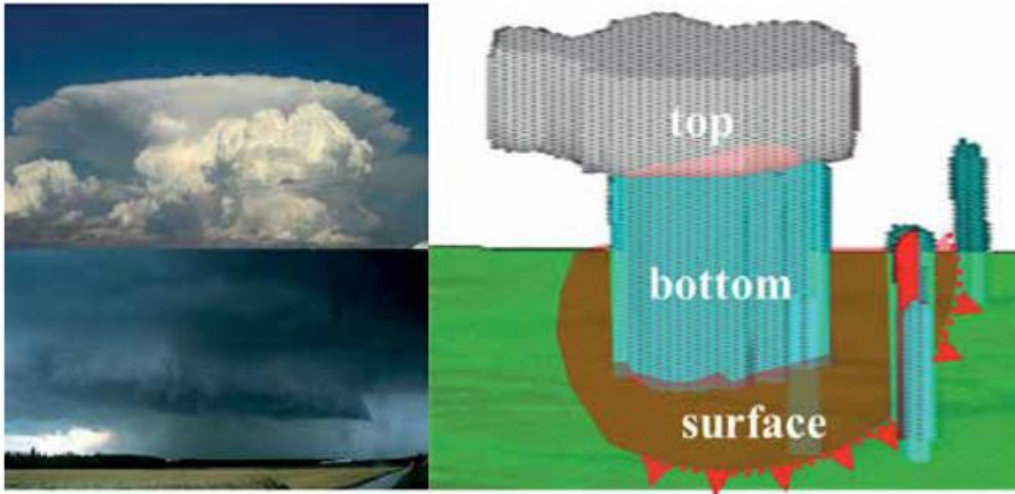


Abb. 16-10: Links: Fotografien eines Gewitters (oberes Foto: M. Köhler). Rechts: Gewitterobjekte rekonstruiert aus Nowcasting-Algorithmen (TAFFERNER et al. 2012).

Sinn, von der deterministischen Beschreibung eines Wetterobjekts zu einer probabilistischen Abschätzung zu gehen, je weiter die Vorhersage in die Zukunft reicht. Dies ist in Abbildung 16-11 schematisch dargestellt. Während zur Analysezeit eine 3-D-Beschreibung des Gewitters inklusive seiner Böenlinie möglich ist, kann für die nächsten 30 Minuten nur der Ort des Eintreffens des Gewitters vorhergesagt werden. Über eine Stunde hinaus,

Das Kernstück von WxFUSION ist die Fusion der Daten (Zentrum von Abb. 16-9). Seine Aufgabe ist, aus allen verfügbaren Beobachtungs-, Nowcasting- und Vorhersagedaten die erforderlichen Parameter zu bestimmen, die das Wetterobjekt und dessen vergangene, gegenwärtige und zukünftige Entwicklung beschreiben. Ein erfahrener Meteorologe macht sich durch Kombination und Vergleich von Beobachtung, Nowcasting und Vorhersage zusammen mit seiner Erfahrung ein Bild über die Entwicklung eines Wetterphänomens. Dieses Verhalten imitiert das Kernstück von WxFUSION unter Verwendung von unscharfer Logik („Fuzzy Logic“). Im Gegensatz zu reinen Wahr-Falsch-Entscheidungen, ermöglicht Fuzzy Logic einen Übergang zwischen wahr und falsch, ermöglicht also, dass eine Information teilweise wahr und teilweise falsch ist. Jede Information aus einer Datenquelle kann entsprechend ihres Beitrags zu einem Wetterphänomen gewichtet werden. Durch eine adäquate Kombination aller gewichteten Beiträge kann schließlich eine Entscheidung getroffen werden, zum Beispiel, wie stark ein Gewitter ist, oder ob sich ein Gewitter weiter verstärkt oder abschwächt.

kann nur noch eine Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Gewitters vorhergesagt werden. Denn im Hinblick auf die typische Lebensdauer eines Gewitters und der Unsicherheit der numerischen Vorhersagen, würde es keinen Sinn machen ein Gewitter über eine Stunde hinaus deterministisch vorherzusagen. Numerische Vorhersagen sind oft in der Lage Gewitterfronten beziehungsweise die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Gewittern in einer bestimmten Region recht gut vorherzusagen. Wo und wann genau jedoch einzelne Gewitterzellen auftreten, ist jedoch nach wie vor schwierig, die lokale Vorhersagegüte der numerischen Vorhersagen daher schlecht. Hier kann die Kombination mit Nowcasting-Methoden weiter helfen. Aktuelle Forschungsarbeiten (KÖHLER 2011) kombinieren Nowcasting-Algorithmen mit numerischen Vorhersagen, um die Vorhersagegüte zu verbessern (vergleiche Abb. 16-3, *Expert System*). Dabei spielt die Bewertung der Vorhersagegüte eine wesentliche Rolle (FORSTER und TAFFERNER 2009).

Für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung eines Gewitters stehen ausschließlich Nowcasting-Verfahren und numerische Vorhersagen zur Verfügung. Es macht daher

#### 4 Abschließende Bemerkungen

Die Beispiele, die in diesem Artikel gezeigt wurden, waren auf Gewitter beschränkt. Am DLR-IPA, beim DWD und weiteren Wetterdiensten und Forschungsinstituten

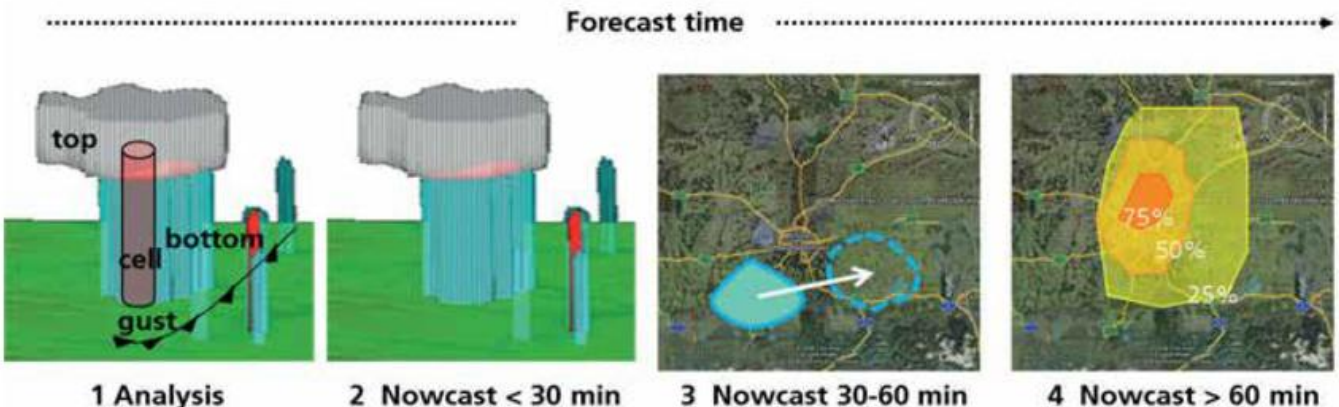


Abb. 16-11: Nowcasting: Mit fortschreitender Vorhersagezeit werden immer weniger Details zur Beschreibung des Objekts ausgegeben.

weltweit gibt es aber auch Forschungsarbeiten zur Vorhersage von weiteren Wetterphänomenen, die eine Gefahr für den Luftverkehr sind. Dazu zählen zum Beispiel Turbulenz, Wirbelschleppen und Winterwetterbedingungen. Auch für diese Phänomene können Datenkombinationstechniken ähnlich zu den hier vorgestellten zum Einsatz kommen. Nicht nur für den Luftverkehr ist es wichtig, dass Nowcasting-Methoden und Expertensysteme weiter entwickelt und verbessert werden, sondern auch für andere Bereiche wie Landwirtschaft, Schifffahrt und Katastrophenschutz. Große Erwartungen werden dabei auch in den Einsatz von Ensemblevorhersagen gelegt (CRAIG 2012). In naher Zukunft ist abzusehen, dass deterministische und probabilistische Vorhersagen im Bereich von 0 bis 6 Stunden den Nutzern in der Luftfahrt mit ausreichender Genauigkeit zur Verfügung stehen. Damit kann der Einfluss des Wetters auf den Flugverkehr minimiert werden.

### Danksagung

Einige der in diesem Artikel präsentierten Arbeiten wurden finanziert durch das DLR Projekt „Wetter und Fliegen“ (2008 – 2011), und die EU-Projekte FLYSAFE und RISK-AWARE. Vielen Dank an die Firma nowcast GmbH für die Bereitstellung der LINET-Blitzdaten zu Forschungszwecken und an das Meteorologische Institut der Universität Wien für das VERA-System. Frau Kristin Raykova danken wir für die Hilfe bei der Literaturrecherche und der Erstellung des Glossars zu diesem Artikel.

### Literatur

- BALDAUF, M., SEIFERT, A., FÖRSTNER, J., MAJEW-SKI, D., RASCHENDORFER, M., REINHARDT, T., 2011: Operational convective-scale numerical Weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities. *Mon. Weather Rev.* **139**, 3887–3905.
- BETZ, H. D., SCHMIDT, K., OETTINGER, W. P., AND MONTAG, B., 2008: Celltracking with lightning data from LINET. *Adv. Geosci.* **17**, 55–61, doi:10.5194/ad-geo-17-55-2008.
- BETZ, H. D., SCHUMANN, U., LAROCHE, P., (Eds), 2009: Lightning: Principles, Instruments and Applications. *Springer*, Heidelberg, 641 pp.
- BRETL, S., 2010: Untersuchung des Lebenszyklus von Gewittern in Mitteleuropa mit Hilfe von Fernerkundungs- und Modelldaten. Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
- BROWNING, K. A., 1982: Nowcasting. *Academic Press*, London, 256 pp.
- CONWAY, B. J., 1998: An overview of nowcasting techniques. In: SAF Training Workshop- Nowcasting and Very Short Range Forecasting. *EUMETSAT*.
- COST 722, 2004: WWRP/NWP Expert Meeting. *FMI*, Helsinki, 9–11 June 2004.
- CRAIG, G., 2012: Probabilistic Weather Forecasting, in: Atmospheric Physics, edited by U. Schumann. *Springer*, DOI: 10.1007/978-3-642-30183-4.
- DENGLER, K., ANGER, J., KEIL, C., 2011: Validation of time-lagged ensemble forecasts relevant for predicting aircraft wake vortices. *Meteorol. Z.* **20**, 625–634.
- EVANS, J., DUCOT, E., 1994: The integrated terminal weather system (ITWS). *MIT Lincoln Laboratory J.* **7**, 2, 449.
- FORSTER, C., TAFFERNER, A., 2012: Nowcasting and forecasting thunderstorms for air traffic with an integrated forecast system based on observations and model data. WMO Symposium on Nowcasting, Whistler, B.C., Canada, 30 August - 4 September 2009.
- FORSTER, C., TAFFERNER, A., 2012: Nowcasting Thunderstorms for Munich Airport. Forschungsbericht, DLR, 14 pp.
- GERZ, T., SCHUMANN, U., 2013: Aviation (Hazards to), in: Encyclopedia of Earth Sciences Series, Encyclopedia of Natural Hazards, edited by P. T. Bobrowsky., *Springer*, 34-39, doi: 10.1007/978-1-4020-4399-4\_8.
- GERZ, T., FORSTER, C., TAFFERNER, A., 2012 a: Mitigating the Impact of Adverse Weather on Aviation, in: Atmospheric Physics, edited by U. Schumann. *Springer*, DOI: 10.1007/978-3-642-30183-4.
- GERZ, T., FORSTER, C., TAFFERNER, A., 2012 b: Mitigating the impact of adverse weather on aviation. In: Atmospheric Physics: Background - Methods - Trends Research Topics in Aerospace. *Springer*, 645-660.
- HEIMANN, D., KURZ, M., 1985: The Munich Hailstorm of July 12, 1984—a discussion of the synoptic situation. *Beitr. Phys. Atmos.* **58**, 528–544.
- HÖLLER, H., REINHARDT, M.E., 1986: The Munich Hailstorm of July 12, 1984—convective development and preliminary hailstone analysis. *Beitr. Phys. Atmos.* **59**, 1, 1–12.
- KOBER, K., TAFFERNER, A., 2009: Tracking and nowcasting of convective cells using remote sensing data from radar and satellite. *Meteorol. Z.* **18**, 75–84, doi:10.1127/0941-2948/2009/359.
- KÖHLER, M., 2011: Untersuchung der Auslösung von Gewittern während der “Wetter und Fliegen“- Sommerkampagne 2010. Masterarbeit, *DLR/IPA*.
- LANG, P., PLÖRER, O., MUNIER, H., RIEDL, J., 2003: KONRAD - ein operationelles Verfahren zur Analyse von Gewitterzellen und deren Zugbahnen, basierend auf Wetterradarprodukten. *Berichte des Deutschen Wetterdiensts* **222**.
- MUELLER, C., SAXEN, T., ROBERTS, R., WILSON, J., BETANCOURT, T., DETTLING, S., OIEN, N., YEE, J., 2003: NCAR auto-nowcast system. *Weather Forecast* **18**, 4, 545–561.
- STEINACKER, R., PÖTTSCHACHER, W., DORNINGER, M., 1997: Enhanced resolution analysis of the atmosphere over the Alps using the fingerprint technique. *Annalen der Meteorologie* **35**, 235–237.
- STICH, D., FORSTER, C., ZINNER, T., TAFFERNER, A., 2011: Convection initiation-nowcasting by data fusion and its verification. In: European Conferences on Se-

- vere Storms (ECSS 2011), Palma de Mallorca, Balearic Islands, Spain, 3–7 October 2011.
- TAFFERNER, A., FORSTER, C., HAGEN, M., KEIL, C., ZINNER, T., VOLKERT, H., 2008: Development and propagation of severe thunderstorms in the Upper Danube catchment area: towards an integrated nowcasting and forecasting system using real-time data and high-resolution simulations. *Meteorol. Atmos. Phys.* **101**, 211–227, doi:10.1007/s00703-008-0322-7.
- TAFFERNER, A., FORSTER, C., HAGEN, M., HAUF, T., LUNNON, B., MIRZA, A., GUILLOU, Y., ZINNER, T., 2010: Improved thunderstorm weather information for pilots through ground and satellite based observing systems. In: 14th conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 90<sup>th</sup> AMS Annual Meeting, Atlanta, 17–21 January 2010.
- TAFFERNER, A., FORSTER, C., 2012: Weather Nowcasting and Short Term Forecasting, in: Atmospheric Physics edited by U. Schumann. *Springer*, DOI: 10.1007/978-3-642-30183-4.
- TAFFERNER, A., FORSTER, C., GERZ, T., 2012: Concatenating weather monitoring and forecast: the WxFUSION concept. In: Gerz, T., Schwarz, C. (eds.), The DLR Project Wetter & Fliegen, Final Report. *DLR-FB 2012-02*, 25–30.
- WALTER, A., TREPTE, S., THEHOS, R., 2009: Statistische Vorhersage- und Warnverfahren: MOS-MIX, WarnMOS, BlitzMOS und CellMOS, In: Moderne Verfahren und Instrumente der Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst. *Promet* **35**, 1–3.
- WEIGL, E., KLINK, S., KOHLER, O., REICH, T., ROSENOW, W., LANG, P., POD-LASLY, C., WINTER-RATH, T., ADRIAN, G., MAJEWSKI, D., LANG, J., 2005: Projekt RADVOR-OP - Radargestützte, zeitnahe Niederschlagsvorhersage für den operationellen Einsatz (Niederschlag-Nowcasting-System), Abschlussbericht. *Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie*.
- WILSON, J.W., CROOK, N.A., MUELLER, C.K., SUN, J., DIXON, M., 1998: Nowcasting thunderstorms: a status report. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **79**, 10, 2079–2093.
- WILSON, J.W., EBERT, E., SAXEN, T.R., ROBERTS, R.D., MUELLER, C.K., SLEIGH, M., PIERCE, C.E., SEED, A., 2004: Sydney 2000 Forecast Demonstration Project: Convective Storm Nowcasting. *Weather and Forecasting* **19**, 131 – 150.
- ZINNER, T., MANNSTEIN, H., TAFFERNER, A., 2008: Cb-TRAM: tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data. *Meteorol. Atmos. Phys.* **101**, doi:10.1007/s00703-008-0290-y.
- ZINNER, T., FORSTER, C., DE CONING, E., BETZ, H.-D., 2013: Validation of the Meteosat storm detection and nowcasting system Cb-TRAM with lightning network data - Europe and South Africa. *Atmos. Meas. Tech.* **6**, 1567–1583, doi:10.5194/amt-6-1567-2013.

# 17 K. ROLOFF, F. KALINKA, T. HAUF Flugzeugvereisung

## Aircraft Icing

### Zusammenfassung

Flugzeugvereisung ist eine der Hauptwetterrisiken in der Luftfahrt und stellt daher seit vielen Jahren einen wichtigen Zweig der verkehrsmeteorologischen Forschung dar. In diesem Artikel werden zunächst alle Vereisungsphänomene vorgestellt, die an einem Flugzeug und seinen Bauteilen beobachtet werden können. Schwerpunktmäßig wird im zweiten Teil des Artikels die Vereisung durch Einwirkung von unterkühltem Flüssigwasser näher betrachtet. Hierzu werden die meteorologischen Grundlagen und auch technische Einflussgrößen dargestellt. Zuletzt werden die Möglichkeiten einer Vereisungsvorhersage erörtert und das deutsche Vereisungswarnsystem ADWICE vorgestellt.

### Summary

Aircraft icing is one of the most hazardous weather phenomena for aviation and therefore an important field of research in aviation meteorology. In the first part, this article will overview all icing phenomena which can be observed on an aircraft and its technical devices. In the second part of the article, the focus will be on aircraft icing which can be traced back to supercooled liquid water. Both meteorological and technical background will be illustrated. In a final step, different ways for the warning and prediction of aircraft icing will be introduced. Furthermore the German aircraft icing warning system ADWICE will be presented.

## 1 Vereisungsproblematik in der Luftfahrt

Bereits seit den 1940er Jahren wird Forschung auf dem Gebiet der Flugzeugvereisung betrieben. Obwohl das Bewusstsein für die negative Beeinflussung der Flugsicherheit durch Vereisung seit dieser Zeit stetig wächst, kommt es immer wieder zu Vorfällen und Unfällen. Am 31. Oktober 1994 stürzte eine propellergetriebene ATR 72 beim Anflug auf den Flughafen Chicago O'Hare in ein Feld nahe Rose-lawn (Indiana). Aufgrund von erhöhtem Verkehrsaufkommen befand sich die Maschine etwa 30 Minuten lang im  *Holding*  innerhalb eines Flugniveaus, in dem unterkühlter Niesel auftrat. Eis setzte sich auf dem Flugzeug und seinen Bauteilen ab, wodurch der Auftrieb reduziert und eine Rollinstabilität initiiert wurde. Das Flugzeug kam infolgedessen in eine unkontrollierte Fluglage und stürzte ab. Alle 68 Insassen kamen ums Leben. Spätestens der Absturz dieser Maschine unterstrich den Bedarf an verbesserten Vorhersagesystemen, die über die Standardwarnverfahren hinausgingen und meteorologische Parameter wie den Flüssigwassergehalt und die Tropfengröße mit einbezogen. Die Entwicklung so genannter Expertensysteme, die in Kapitel 3 näher beschrieben werden, begann.

Zunächst muss jedoch unterschieden werden, ob sich der Eisansatz während des Fluges oder am Boden bildet. Das erste Kapitel gibt einen Überblick über verschiedene Vereisungsphänomene und erörtert ihre Entstehung sowie technische Maßnahmen, die das Flugzeug gegen die jeweilige Art der Vereisung schützen soll. Der Schwerpunkt des vorliegenden Artikels bezieht sich auf die Vereisung in der Flugphase durch das Einwirken von unterkühlten Tropfen auf die Flugzeugoberfläche (*Inflight Icing*).

### 1.1 Vereisung am Boden

Beim Aufenthalt von Flugzeugen an einem Flughafen kann auf der Flugzeugoberfläche und innerhalb von Flugzeugbauteilen Vereisung auftreten. In der englischen Fachliteratur werden diese Phänomene in ihrer Gesamtheit als *Ground Icing* bezeichnet und sind ein typisches Winterwetterproblem (siehe hierzu auch weitere Beiträge im Heft zum Thema Winterwetter). Je nach vorherrschenden meteorologischen Bedingungen unterscheiden sich die Eisablagerungen in Art und Auftreten. Bei festem Niederschlag in Form von Schnee sind die Ablagerungen auf den Flugzeugen meist deutlich zu erkennen. Eisschollen, die sich

während der Startphase beziehungsweise Flugphase (zum Beispiel durch den Einsatz eines Enteisungssystems) lösen, können sowohl das Flugzeug beschädigen als auch seine Insassen erheblich verletzen. Ein Anfrieren der Schneeauf-lage bei Temperaturen um  $0^{\circ}\text{C}$  ist jedoch ebenfalls mög-lich. Es muss beachtet werden, dass insbesondere feuchter Schnee und Eis-Wasser-Gemische in der Startphase nicht zwangsläufig von der Flugzeugoberfläche heruntergeweht werden. Derartige Ablagerungen stellen eine große Gef-ahr für den sicheren Betrieb des Flugzeugs dar, denn sie vermindern den Auftrieb, erhöhen die erforderliche Start-leistung des Flugzeugs und verändern die Aerodynamik. Ende Dezember 2001 stürzte eine Britten Norman 2B-26 nach dem Start vom Flughafen Bremerhaven in die nahe gelegene Weser. Acht der neun Insassen kamen bei diesem Unfall ums Leben. Als Unfallursache wurden durch die Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung (BFU) Schneea-blagerungen auf den Tragflächen des Flugzeugs festgestellt, die nicht ordnungsgemäß vor dem Start entfernt worden sind (BFU 2004).

Flüssiger Niederschlag kann ebenso zu Vereisung auf am Boden befindlichen Flugzeugen führen. Die dabei statt-findenden Prozesse gleichen denen des *Inflight Icings* und werden daher im nächsten Abschnitt genauer betrachtet. Aber auch sekundäre Effekte können zur Vereisung von Flugzeugbauteilen am Boden führen.

- Durch das Abschalten der Triebwerke nach Einneh-men der Parkposition können flüssige Rückstände (bei-spielsweise von angesaugtem Schnee, der im Trieb-werk geschmolzen ist) erneut gefrieren.
- Befinden sich flüssige Rückstände von Niederschlags-ereignissen auf der Flugzeugoberfläche, in Eintritts-schächten oder Gelenken, so können diese Rückstände durch ein Absinken der Umgebungstemperatur unter  $0^{\circ}\text{C}$  (zum Beispiel in der Nacht) gefrieren. Sowohl am Boden als auch in der Luft können festgefrorene Ruder oder sonstige unbewegliche Bauteile bis zur Manö-rierunfähigkeit des Flugzeugs führen.
- Landet ein Flugzeug nach einem schnellen Abstieg aus großer Reiseflughöhe, ist es möglich, dass bei größeren Mengen des sich in den Flügeltanks befindlichen Kero-sins die Anpassung an die umgebende Lufttemperatur verzögert verläuft und die Temperatur der Flügelober-fläche daher anders als die Lufttemperatur unter dem Gefrierpunkt liegen kann.
- Verweilt ein Flugzeug über Nacht an einem Flughafen, kann die Temperatur der Flugzeugoberfläche durch langwellige Ausstrahlung unter  $0^{\circ}\text{C}$  sinken.

In den beiden letztgenannten Fällen ist mit einsetzendem Regen eine Vereisung bei Lufttemperaturen leicht über  $0^{\circ}\text{C}$  möglich.

Alle aufgeführten Phänomene haben einen Einfluss auf die Strömungseigenschaften des Flugzeugs und damit auf sei-nen Auftrieb, sofern ein Start mit den erläuterten Ablage-rungen durchgeführt werden würde. Daher ist es notwen-dig, Flugzeuge vor dem Start von vorhandenen Schnee- und

Eisablagerungen zu befreien (*De-Icing*) und vor Vereisung während der Wartezeit auf Startfreigabe und der Startphase zu schützen (*Anti-Icing*). Hierfür werden so genannte *Air-craft De-Icing/Anti-Icing-Fluide* (ADF) genutzt, die den Gefrierpunkt für Wasser auf der Flugzeugoberfläche her-absetzen. Durch eine variable Zusammensetzung aus Gly-kol und Wasser können entsprechend der nötigen Anwen-dung verschiedene Viskositäten des ADF erzielt werden. Fluide zum Entfernen von bereits bestehenden Eisansätzen haben einen niedrigen Viskositätswert, werden erhitzt auf die Flugzeugoberfläche aufgetragen und fließen nach der Behandlung ohne weitere Vorkehrungen ab. Um Flugzeu-ge vor einer Wiedervereisung zu schützen, werden Fluide genutzt, die durch den Zusatz von Verdickern einen hohen Viskositätswert aufweisen. Diese *Anti-Icing-Fluide* werden auch als *non-newtonian* bezeichnet, da sie auf der Flug-zeugoberfläche verbleiben, bis in der Startphase durch die umströmende Luft Scherkräfte auf die Flugzeugoberfläche einwirken, sodass die Viskosität des Fluids herabgesetzt wird und es von der Oberfläche abfließt. Dieser Schutz vor Wiedervereisung weist eine begrenzte Wirkungszeit auf, die so genannte Vorhaltezeit oder *Holdover Time*. Je nach eingesetztem Fluid, Umgebungstemperatur und vorherr-schender Wittersituation kann diese Vorhaltezeit sehr stark variieren. Der Pilot muss kurz vor dem Start überprüfen, ob die Vorhaltezeit noch nicht überschritten ist. Andern-falls ist ein weiteres *Anti-Icing* erforderlich, um einen Start ohne Kontamination der Flugzeugoberfläche sicher zu stel-len (AEA 2012).

## 1.2 Vereisung während des Flugs

*InFlight Icing* bezeichnet Vereisung während der Flug-phase mit einer Eisakkumulation an den Tragflächen, am Flugzeugrumpf und sonstigen äußeren Bauteilen. Diese Akkumulation entsteht durch in der Atmosphäre befind-



Abb. 17-1: Das Forschungsflugzeug DLR Dornier 228 nach dem Durchflug von Vereisungsbedingungen während der Messkam-pagne EURICE (Quelle: Thomas Hauf, ehemals DLR, 1998).

liches unterkühltes Flüssigwasser (*supercooled liquid water*) in Form von Wolken-, Niesel- und Regentropfen. Es befindet sich in einem metastabilen Zustand und kann bei Kontakt mit einem Eiskeim, in diesem Fall der Flugzeugoberfläche, gefrieren. Tropfengröße, vorherrschende Lufttemperatur und Flüssigwassergehalt der Atmosphäre sind die bestimmenden Parameter für Wachstumsrate, Form und Konsistenz der Eisakkumulation (siehe hierzu Abschnitt 2.1). Eisakkumulationen führen zu einer Änderung der aerodynamischen Strömungsverhältnisse und im schlimmsten Fall zu einem Strömungsabriss (POLITOVICH 1996). Vereiste Tragflächen, wie in Abbildung 17-1 gezeigt, resultieren in einem größeren Luftwiderstand, der nur durch eine erhöhte Motorleistung ausgeglichen werden kann. Zudem wird der Auftrieb vermindert. Bei kleineren Maschinen kann ein unsymmetrischer Eisansatz an den Propellern zu starken Vibrationen und zu einer Deformation der Propellerblätter führen. Eine Vereisung von Höhen- und Seitenleitwerken behindert die Manövrierfähigkeit des Flugzeugs. Aber auch andere Phänomene können die Handlungsfähigkeit des Piloten einschränken. Durch Vereisung der Cockpitscheiben ist eine visuelle Orientierung im Raum nicht mehr möglich. Zudem kann der Eisansatz am Flugzeug nicht mehr vom Piloten beobachtet werden, um eventuelle Gegenmaßnahmen einzuleiten. Sind an der Außenhaut angebrachte Antennen vereist, ist die Kommunikation per Funk zum Erdboden erschwert oder gar nicht mehr möglich. Durch Vereisung von Messinstrumenten wie dem Pitotrohr zur Geschwindigkeitsmessung oder dem Venturirohr zur Navigation muss mit fehlerhaften Anzeigen im Cockpit gerechnet werden. Sollte der Autopilot in diesem Fall noch eingeschaltet sein, kann es zu unkontrollierten Manövern kommen. Um gefährliche Zwischenfälle zu vermeiden, sind die meisten Flugzeuge mit Enteisungsvorrichtungen ausgestattet, die in Abschnitt 2.2 näher beschrieben werden.

Eine weitere, nicht zu unterschätzende Gefahr geht von der so genannten Vergaservereisung bei Kolbenmotoren aus. Beim Ansaugen der Umgebungsluft durch den Vergaser expandiert die Luft und wird um einige Kelvin abgekühlt. Wird nun Treibstoff in diesen beschleunigten Luftstrom hinzugegeben, verdunstet dieser, wobei der Umgebung latente Wärme entzogen wird. In der Summe können diese beiden Effekte eine Temperaturdifferenz von bis zu 30 K zur Umgebungsluft und daher eine Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes im Vergaser hervorrufen. Beträgt die relative Feuchte mindestens 60 %, so kann der in der Luft enthaltene Wasserdampf innerhalb des Vergasers resublimieren und sich an Bauteilen niederschlagen. Hierdurch wird der Eintritt des Luft-Treibstoff-Gemischs in den Verbrennungsraum des Motors behindert und somit die Motorleistung verringert. Bei starken Eisansätzen innerhalb des Vergasers kann dieses Phänomen zu einem Totalausfall des Motors führen (PARTIE und PETERSON 2009). Neuere Motoren sind heute mit einem Heizsystem ausgestattet. Im Falle einer Vergaservereisung muss der Pilot das Problem

erkennen und die Heizung manuell einschalten, sodass der Eisansatz schmelzen kann.

Zuletzt soll auf das Problem der Vereisung durch einen hohen Eiswassergehalt (*High Ice Water Content HIWC* oder auch *Ice Crystal Icing*) eingegangen werden. Es tritt, anders als die Vereisung durch unterkühltes Flüssigwasser, bei Temperaturen unter  $-40^{\circ}\text{C}$  auf und kann daher ohne Zweifel auf Eiskristalle zurückgeführt werden. Die Eiskristalle können auf zweierlei Weise den sicheren Betrieb des Luftfahrzeugs stören. Zum einen ist ein Zusetzen von Lufterlässen und Messinstrumenten möglich. Die sich hierdurch ergebenden Probleme für die Manövrierfähigkeit des Flugzeugs wurden bereits beschrieben. Zum anderen können die Eiskristalle von den Turbinen angesaugt werden und so in das Innere des Triebwerks gelangen. Während die festen Partikel von kühlen Oberflächen abprallen, bleiben sie an wärmeren Bauteilen haften und schmelzen. Der dabei entstehende Wasserfilm kann wiederum Eispartikel einfangen, wodurch die Temperatur der Metallbauteile langsam herabgesetzt wird, bis der Gefrierpunkt erreicht ist und sich ein Eisansatz bildet. Dieser Eisansatz kann zu einem Leistungsabfall im Triebwerk sowie, je nach Ort der Akkumulation, zu erheblichen Vibrationen führen. Lösen sich Teile des Eises ab, kann dies zu einer Beschädigung des Triebwerks führen, im schlimmsten Fall droht ein Triebwerksaufschlag (MASON 2007). Das Phänomen der Vereisung durch einen hohen Eiswassergehalt ist erst in jüngerer Zeit in den Fokus der Luftfahrtindustrie und der Vereisungsforschung gerückt, nachdem sich Vorfälle und Unfälle häuften. Ein Beispiel hierfür ist der Absturz der Air France Maschine AF 447 über dem atlantischen Ozean auf dem Weg von Rio de Janeiro nach Paris am 1. Juni 2009. Ein zum Absturz der Maschine mit 228 Insassen beitragender Faktor ist das Zusetzen des Pitot-Rohres durch Eiskristalle in der Nähe eines tropischen Gewitters (BEA 2012). Generell sind Gebiete mit hohem Eiswassergehalt meist in der Nähe von konvektiven Systemen zu beobachten. Durch starke Aufwinde werden erhebliche Wassermassen in höhere Atmosphärenschichten transportiert. Im Bereich des Amboss ist daher mit einer erhöhten Konzentration von Eiskristallen zu rechnen. Die Partikel werden oft vom Onboard-Radar des Flugzeugs aufgrund ihrer geringen Größe nicht erkannt. Nur das Meiden dieser Gefahrenzone durch das Einhalten eines Sicherheitsabstands beim horizontalen Ausweichen von konvektiven Systemen verhindert eine Gefährdung des Luftfahrzeugs.

Über 100 Vorfälle mit Leistungsabfall der Triebwerke wurden schon berichtet (MASON et al. 2006). Das europäische Projekt HAIC will mit zwei Flugmesskampagnen über dem Atlantik und bei Darwin unter internationaler Beteiligung die meteorologischen Bedingungen für das Auftreten klären. Sicher ist bis jetzt nur, dass unterkühltes Wolkenwasser als notwendiger Bestandteil des Triebwerksausfalls nicht vorhanden sein muss, da der Effekt bis  $-60^{\circ}$  Celsius beobachtet wurde, in Temperaturbereichen, wo flüssiges Wasser längst gefroren wäre (MASON 2007).

## 2 Meteorologische und technische Grundlagen des *In-flight Icing*

Im folgenden Abschnitt wird der Zusammenhang der Flugzeugvereisung durch unterkühltes Flüssigwasser mit verschiedenen meteorologischen und technischen Parametern dargelegt. Zudem werden technische Maßnahmen zum Vereisungsschutz und Standard-Warnverfahren erläutert. Zuletzt soll auch auf die Zulassungsverfahren für Flugzeuge und Piloten eingegangen werden.

### 2.1 Zusammenhang mit meteorologischen Parametern

Für die Bildung von unterkühltem Flüssigwasser sind verschiedene meteorologische Prozesse relevant, die im Folgenden dargelegt werden sollen. Je nach meteorologischen und flugzeugspezifischen Faktoren kann der sich bildende Eisansatz verschiedene Eigenschaften aufweisen, wie Abschnitt 2.1.2 zeigen wird.

#### 2.1.1 Zugrunde liegende meteorologische Prozesse

Die Existenz von unterkühltem Flüssigwasser kann sowohl in konvektiver als auch in stratiformer Bewölkung möglich sein. Im konvektiven Fall (zum Beispiel in Verbindung mit dem Auftreten von Warm- und Kaltfronten, bei erzwungener Hebung im Luv von Gebirgen und in Gewitterzellen) tritt das Kondensationsniveau oberhalb der Null-Grad-Isothermen auf. Zudem können Tropfen durch die Aufwinde im Zentrum konvektiver Systeme lange in der Wolke gehalten werden und auch in großen Höhen unterkühlt auftreten. Im stratiformen Fall bilden sich über den „Warmen-Regen-Prozess“ Nieseltropfen. Bis zu einer Temperatur von  $-12^{\circ}\text{C}$  ist die Wahrscheinlichkeit für die Aktivierung von Eiskeimen gering, so dass stratiforme Bewölkung je nach Umgebungsbedingungen oftmals fast gänzlich aus unterkühlten Tropfen besteht.

Auch aus unterkühlten Tropfen bestehender Nebel (*freezing fog*) stellt eine Gefahr für den Luftverkehr dar, besonders wenn er in der Nähe von Flughäfen auftritt. Startende, landende und abzufertigende Flugzeuge haben keine Möglichkeit, den Kontakt mit den Tröpfchen zu vermeiden. Mit der erhöhten Vereisungsgefahr geht zudem eine verringerte Sichtweite einher.

Letztlich birgt auch gefrierender Niederschlag ein hohes Vereisungsrisiko. Dieser entsteht immer dann, wenn fester Niederschlag in eine Schmelzschicht fällt, die ausreichend mächtig ist, um die Niederschlagspartikel vollständig zu verflüssigen. Fallen die Tropfen im Anschluss in eine Schicht mit Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes, so werden sie unterkühlt. Nicht nur am Boden, sondern auch in höheren Schichten (*elevated freezing rain*) führen die Niederschlagstropfen vor allem durch ihre Größe und den damit einhergehenden erhöhten Flüssigwassergehalt zu einem großen Vereisungsrisiko. In diesem Zusammenhang wird von *supercooled large droplets* (SLD) gesprochen, sofern die auftretenden Tropfen einen Durchmesser

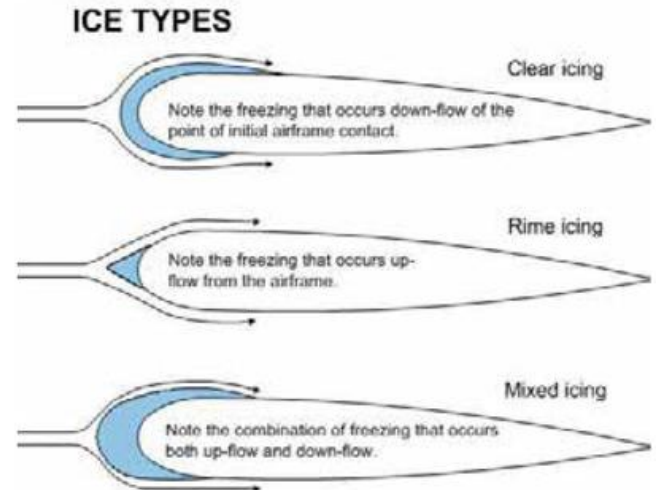


Abbildung 17-2: Verschiedene Arten des Eisansatzes (Quelle: [www.langleyflyingschool.com/Pages/CPGS Meteorology, Part 2.html](http://www.langleyflyingschool.com/Pages/CPGS_Meteorology_Part_2.html), adaptiert aus dem *Air Command Weather Manual*, Transport Canada).

von mehr als  $50\ \mu\text{m}$  aufweisen. Warum gerade ihr Kontakt mit der Flugzeugoberfläche eine erhöhte Gefahr darstellt, wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

#### 2.1.2 Arten des Eisansatzes

Das Erscheinungsbild und die Eigenschaften des durch *In-flight Icing* resultierenden Eisansatzes richten sich nach meteorologischen und flugzeugspezifischen Einflussparametern. Meteorologisch betrachtet ist die Art des Eisansatzes abhängig von der Umgebungstemperatur, vom Flüssigwassergehalt sowie dem Tropfenspektrum (POLITOVICH 1996). Während kleinere Tropfen oftmals den Stromlinien der Luft um das Flugzeug und seine Bauteile folgen können, sind größere Tropfen träger und kollidieren mit einer höheren Wahrscheinlichkeit mit der Flugzeugoberfläche, wo sie gefrieren.

PRUPPACHER und KLETT (1997) haben gezeigt, dass der Gefrierprozess von großen Tropfen, zum Beispiel SLD, in zwei Stufen vollzogen wird. Während der ersten Stufe gefriert der um  $\Delta T = 273,15 - T_v$  unterkühlte Tropfen ( $T_v$  entspricht der Umgebungstemperatur) nur zu einem Anteil von  $\Delta T/80$ . Die dabei frei werdende latente Wärme erwärmt das Eis-Wasser-Gemisch innerhalb von Millisekunden auf  $0^{\circ}\text{C}$ . In einer zweiten Stufe des Gefrierprozesses gefriert auch der verbleibende flüssige Anteil des Eis-Wasser-Gemischs. Die Dauer der zweiten Stufe ist vor allem davon abhängig, wie schnell die frei werdende latente Wärme an die Umgebung und die Unterlage (in diesem Fall eventuell eine bereits mit Eis überzogene Oberfläche) abgegeben werden kann. Der Gefrierprozess nimmt in der Summe einige Sekunden in Anspruch, innerhalb derer sich das verbleibende Gemisch mit dem mittleren Luftstrom auf der Flugzeugoberfläche verteilen kann. Dabei bildet sich das so genannte Klareis (*clear/glaze ice*), welches sich vornehmlich in Streifen über eine Tragfläche verteilt, wie auch auf Abbildung 17-1 zu erkennen ist. Durch diesen Prozess ist es möglich, dass Vereisung nicht nur an der Profilvorderkante

auftritt, sondern auch ungeschützte Bereiche im hinteren oberen Teil und unterhalb der Tragfläche betroffen sind. Klareis weist eine glatte und durchsichtige Erscheinung auf und ist oftmals optisch nur schwer zu erkennen. Im Bereich der Profilvorderkante der Tragfläche kann sich zudem ein so genanntes „Doppelhorn“ ausbilden, das ebenfalls durch die Fließfähigkeit der SLD entsteht. Die SLD treffen im Staupunkt der Strömung auf die Oberfläche. Der Gefrierprozess wird dort zusätzlich durch Staupunkt-erwärmung verzögert. Die Tropfen zerfließen in beide Richtungen, sodass ein großer Anteil der Tropfen erst ober- beziehungsweise unterhalb des Staupunktes gefriert. Ein Eisansatz dieser Art bringt eine starke Beeinträchtigung der Tragflächenumströmung mit sich, reduziert somit den Auftrieb und erhöht den Widerstand.

Bei Umgebungstemperaturen weit unterhalb des Gefrierpunktes und kleineren auftreffenden Tropfen findet der gesamte Gefrierprozess sofort statt, da die latente Wärme schneller an die Umgebung abgegeben werden kann. Die Tropfen können daher während des Gefrierens ihre Form beibehalten, wodurch es zu Luft einschließen im Eis kommt. Diese Art der Vereisung ist undurchsichtig und porös, weshalb man auch von Rauheis (*rime ice*) spricht (siehe Abbildung 17-2 Mitte).

Beim Durchflug von Mischwolken kann es zur Bildung von Mischeis (*mixed ice*) auf der Flugzeugoberfläche kommen (siehe Abbildung 17-2 unten). Die durch die kollidierenden Tropfen befeuchtete Oberfläche fängt feste Wolken- und Niederschlagspartikel ein, sodass diese im sich bildenden Eisansatz eingeschlossen werden.

Auch flugzeugspezifische Parameter haben einen Einfluss auf den sich bildenden Eisansatz. Hierzu gehören die Fluggeschwindigkeit, der Anstellwinkel, die Profildicke der Tragflächen, die Länge des Flugwegs innerhalb des Vereisungsraums und ebenso der Flugzeugtyp. Während große Passagiermaschinen auf Mittel- und Langstrecken en Route in Reiseflughöhen fliegen, in denen die Umgebungstemperaturen kein unterkühltes Flüss-

sigwasser mehr zulassen, bewegen sich Turboprop- und Sportflugzeuge in geringeren Höhen und sind damit einem erhöhten Vereisungsrisiko ausgesetzt. Bei Start- und Landephase sowie *Holdings* ist bei entsprechenden Umgebungsbedingungen ein Vereisungsrisiko für alle Flugzeugtypen präsent.

Für Piloten, *Flight Dispatcher* und Flugwetterberater ist von Belang, in welcher Intensität eine vorhergesagte Vereisung auftreten wird. Darunter versteht man die Akkumulationsrate des Eises auf der Flugzeugoberfläche in  $g\ m^{-2}\ h^{-1}$ . Je ausgeprägter der Eisansatz pro Stunde Flugzeit in Vereisungsbedingungen ist, umso höher ist dementsprechend die zu erwartende Vereisungsintensität, wie auch Tabelle 17-1 zeigt. Die zu betrachtende Akkumulationsrate ist jedoch wiederum von den bereits genannten meteorologischen und flugzeugspezifischen Einflussfaktoren abhängig. Während mithilfe von Vereisungswarnsystemen versucht wird, die meteorologischen Faktoren zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 3), ist eine Betrachtung der flugzeugspezifischen Parameter bisher nicht umgesetzt.

## 2.2 Technische Schutzmaßnahmen

Trotz der heutzutage verfügbaren Vorhersagen von Regionen mit einem Vereisungsrisiko durch unterschiedlichste Warnverfahren (siehe hierzu Abschnitt 2.4) kann es passieren, dass ein Pilot mit seinem Flugzeug auf Vereisungsbedingungen trifft. Schutzmaßnahmen wie das *De-* und *Anti-Icing* vor dem Start schützen nur während der Startphase selbst. Daher sind die Flugzeuge mit weiteren Schutzvorkehrungen ausgestattet, um im Ernstfall den sich bildenden Eisablagerungen entgegen zu wirken. Kleine Turboprop- und Sportflugzeuge sind meist nur mit mechanischen Enteisungssystemen ausgerüstet. Dabei handelt es sich um eine Gummiverkleidung an der Vorderkante der Tragflächen (manchmal auch an Höhen- und Seitenleitwerk), die durch periodisches Aufblasen zur Absperrung des Eispanzers führt. In Abbildung 17-3 ist eine Tragflächenvorderkante nach dem Einsatz dieser pneumatischen Enteisungsanlage zu sehen. Je nach Vereisungsintensität kann es passieren, dass der Eisansatz mit den vorhandenen Mitteln nicht vollständig entfernt werden kann. Gerade bei durch SLD hervorgerufenen Eisablagerungen, die auch ungeschützte Bereiche, zum Beispiel unterhalb der Tragflächen treffen können, ist die Gefahr einer unvollständigen Entfernung des Eisansatzes groß. In diesem Fall kann es zu einer Gratabbildung im Bereich der Tragflächen kommen, die zu einem unregelmäßigen Strömungsfeld entlang der Tragfläche führt und daher ähnlich gefährlich ist wie ein nicht entfernter Eisansatz. Mittel- und Langstreckenflugzeuge sowie Frachtmaschinen sind leistungsstärker und können genug Energie für thermische Enteisungsanlagen zur Verfügung stellen. Viele durch Vereisung gefährdete Bauteile des Flugzeugs wie Messsensoren und Tragflächen sind beheizt und beugen so dem Gefrierprozess der auftreffenden Wolken- und Niederschlagstropfen vor.

Akkumulationsrate [g m <sup>2</sup> h <sup>-1</sup> ]	Vereisungsintensität
0	Keine Vereisung ( <i>no icing</i> )
<1	Sehr leichte Vereisung ( <i>trace icing</i> )
<6	Leichte Vereisung ( <i>light icing</i> )
<12	Mäßige Vereisung ( <i>moderate icing</i> )
>12	Schwere Vereisung ( <i>severe icing</i> )

Tabelle 17-1: Über die Eisakkumulationsrate definierte Vereisungsintensität. Die zugrunde gelegte Umströmungsgeschwindigkeit beträgt etwa 90 m/s (LEWIS 1951).



Abbildung 17-3: Tragflächenprofil nach dem Einsatz der pneumatischen Enteisungsanlage. Vor allem unterhalb der Tragfläche sind Eisablagerungen zu erkennen, die durch ihre Lage hinter der Gummiwerkleitung nicht entfernt werden konnten und somit die Aerodynamik der Tragfläche weiterhin stören (Quelle: [http://www.altair.com.pl/news/view?news\\_id=5384](http://www.altair.com.pl/news/view?news_id=5384), übernommen aus der *Aviation Multimedia Library*).

### 2.3 Zulassungsverfahren

Sowohl Pilot als auch Flugzeug müssen für den Flug in Vereisungsbedingungen zertifiziert sein. Die Piloten absolvieren ein spezielles Training im Simulator, um das Verhalten eines vereisten Flugzeugs einschätzen zu können und die richtigen Gegenmaßnahmen zu erlernen. Zudem müssen sie in der Bedienung der Enteisungsanlagen geschult sein, falls diese manuell zu betätigen sind.

Für den Flug durch Vereisungsbedingungen muss ein Flugzeug mit Enteisungsanlagen ausgestattet sein. Um ein Flugzeug zu zertifizieren, muss nachgewiesen werden, dass das Flugzeug in seiner Leistung, Steuerbarkeit und Manövrierfähigkeit beim Flug durch Vereisungsbedingungen nicht so weit eingeschränkt wird, dass ein sicherer Flug nicht mehr gewährleistet werden kann. Hierfür müssen Flugtests und Laboruntersuchungen durchgeführt werden. Dabei wird gleichzeitig die Effektivität der jeweils vorhandenen Enteisungsanlage getestet. Um den weitläufigen Begriff „Vereisungsbedingungen“ zu spezifizieren, wurden durch die FAA im Appendix C der *Federal Aviation Regulations* Minima und Maxima für den Flüssigwassergehalt, die Umgebungstemperatur und das Tropfenspektrum definiert, die während des Fluges durch unterkühlte Wolken- und Niederschlagstropfen erwartet werden (FAA 1968). Dabei wird zwischen konvektiven Bedingungen, in denen die jeweilig gesetzten Maxima zeitweilig erreicht werden (*intermittent maximum*), und stratiformen Bedingungen unterschieden, in denen die Maxima kontinuierlich auftreten können (*continuous maximum*). Kritisch muss bemerkt werden, dass diese Definitionen von Vereisungsbedingungen zwar durch alle weltweiten Zulassungsbehörden anerkannt werden, jedoch SLD kaum in den Definitionen berücksichtigt sind, denn die angegebenen Tropfenspektren betrachten nur Tropfenrößen bis etwa 100 µm. Schwere Vereisungsbedingungen wie in gefrierendem Niesel und gefrierendem Regen sollten

daher, wenn möglich, vermieden werden. Der wissenschaftliche Flug in Gebiete mit erwarteter schwerer Vereisung ist verboten. Aktuelle Projekte wie WEZARD und EXTICE koordinieren die Forschung auf dem Gebiet der Vereisung durch SLD und unterstützen die internationalen Luftfahrtbehörden bei der Erarbeitung von neuen Zulassungsvorschriften für Flugzeuge. Für 2014 wird die Verabschiedung des neuen Appendix O erwartet, der die Zulassungsvorschriften in Vereisungsräumen mit SLD regeln soll.

### 2.4 Standard-Warnverfahren

Die zuverlässigste Methode für eine sichere Flugdurchführung ist die Meidung von Vereisungsräumen. Hierfür benötigt der Pilot Informationen über die zu erwartenden Vereisungsbedingungen entlang seiner Flugroute. Wie auch im PROMET-Artikel „Meteorologische Informationen für die Flugdurchführung“ von Manfred Riediger beschrieben (Heft I), gibt es hinsichtlich der Flugzeugvereisung zwei Standard-Warnverfahren, nämlich *Significant Weather Charts*, die viermal täglich vom jeweils zuständigen *World Area Forecast Center* erstellt werden, und *AIRMETs* (*Airman's meteorological advisory*) beziehungsweise *SIGMETs* (*Significant meteorological advisory*). Beide Meldungsarten werden vom zuständigen *Meteorological Watch Office* ausgegeben. Während *AIRMETs* u.a. über mäßige Vereisung berichten und vornehmlich für kleinere Flugzeuge in geringeren Flughöhen von Interesse sind, informieren *SIGMETs* u.a. über schwere Vereisungsbedingungen, die sowohl in einer *Flight Information Region* (FIR) als auch in einer *Upper Flight Information Region* (UIR) anzutreffen sein können. *SIGMETs* werden daher als primäre Quelle für Vereisungswarnungen in Reiseflughöhe angesehen. In Telegrammform nehmen sie das folgende Format an.

```
WSJP31 RJTD 180930
RJJJ SIGMET 004 VALID 180930/181330 RJTD-
RJJJ FUKUOKA FIR SEV ICE OBS AT 0849Z 7NM SW
OF STE FL140 BY A332
MOV E 20KT NC=
```

Dieser *SIGMET* warnt vor schwerer Vereisung über der FIR Fukuoka am 18. Februar 2013 um 09:30 UTC. Die Station, die den *SIGMET* verbreitet hat, ist Tokio (ICAO-Code RJTD). Die Warnung hat eine Gültigkeit von vier Stunden. Die zugrunde liegende Pilotenmeldung wurde um 08:49 UTC von einem Airbus A332 abgegeben, der sich auf Flugfläche 140 bewegte und Richtung Osten flog.

Wie der Inhalt eines solchen *SIGMETs* schon vermittelt, handelt es sich hierbei um eine Meldung, die räumlich für die gesamte FIR gültig ist. Dem gegenüber steht ein gemeldetes Wetterphänomen, das sich vermutlich nur über einige Kilometer erstreckt. Innerhalb der im Beispiel angegebenen vier Stunden Gültigkeit kann sich das Wetterphänomen längst wieder aufgelöst oder verlagert haben. Im Hinblick auf den stetig zunehmenden Flugverkehr hat eine räumlich und zeitlich höhere Auflösung von Warnungen

sowie eine Benennung von risikofreien Gebieten höchste Priorität. Beides ist durch die Standardwarnverfahren nicht gewährleistet, wird jedoch durch Vereisungswarnsysteme wie ADWICE, das im nächsten Kapitel vorgestellt wird, geleistet.

### 3 Vereisungsvorhersage mit ADWICE

Im folgenden Abschnitt wird das deutsche Vereisungswarnsystem ADWICE vorgestellt. Dabei wird vor allem auf die Entwicklung und den Aufbau des Algorithmus eingegangen. Auch der operationelle Einsatz des Modells wird beschrieben.

#### 3.1 Modellentwicklung

ADWICE (*Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environments*) wurde im Jahre 1998 unter der Zusammenarbeit von DLR, DWD und dem Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover (IMuK) entwickelt. Die zum damaligen Zeitpunkt verfügbaren, numerischen Wettervorhersagemodelle prognostizierten unrealistische Werte für wolkenmikrophysikalische Größen wie den Flüssigwassergehalt der Atmosphäre, wodurch eine reine Modellvorhersage durch Prognose von unterkühltem Flüssigwasser nicht realisierbar war. Vielmehr wurden Postprocessing-Systeme entwickelt, die als Eingabedaten verschiedene Prognosefelder der numerischen Wettervorhersagemodelle sowie Beobachtungsdaten verwendeten und durch empirische Kriterien ein Vereisungsrisiko ableiteten (TAFFERNER et al. 2003). Hieraus ergab sich auch der Begriff des Expertensystems. Als Grundlage des deutschen Vereisungsalgorithmus ADWICE diente der amerikanische RAP-Algorithmus (*Research Application Program*). ADWICE war zunächst ein reines Nowcasting-System, das durch Fusion von Prognose-, Fernerkundungs- und Beobachtungsdaten eine Vereisungswarnung erstellte, der eine Gültigkeit von einer Stunde zugesprochen wurde. Für den Einsatz in der Flugwetterberatung musste

der Algorithmus jedoch so umgestaltet werden, dass auch eine Möglichkeit der Vereisungsprognose besteht. Seit 2003 bietet ADWICE nun eine Vorhersage von Gebieten mit Vereisungsrisiko sowie eine stündliche Diagnose der aktuellen Vereisungsbedingungen, jeweils über dem europäischen Kontinent (LEIFELD 2003).

#### 3.2 Aufbau des Algorithmus

ADWICE bezieht seine Eingangsdaten vom mesoskaligen numerischen Wettervorhersagemodell COSMO-EU. Um die Eingangsdaten direkt verarbeiten zu können, wird ADWICE auf demselben Gitter wie COSMO-EU betrieben. Dieses weist eine horizontale Auflösung von 7 km auf. Es werden jedoch nur die unteren 30 vertikalen Schichten betrachtet, in größeren Höhen ist die Atmosphäre für das Auftreten von unterkühltem Flüssigwasser zu kalt.

ADWICE ist in zwei Abschnitte unterteilt, wie auch Abbildung 17-4 zeigt. Der *Prognostic Icing Algorithm* (PIA) erstellt eine Vorhersage von Gebieten mit Vereisungsrisiko, während der *Diagnostic Icing Algorithm* (DIA) die aktuelle Vereisungssituation untersucht.

##### 3.2.1 Der Prognosealgorithmus ADWICE-PIA

Im Algorithmus zur Vereisungsprognose werden die von COSMO-EU berechneten Eingangsdaten des Drucks, der Temperatur, der spezifischen Feuchte und der parametrisierten Feuchtkonvektion zur Lokalisierung von Gebieten mit einer potentiellen Existenz von unterkühltem Flüssigwasser genutzt (siehe Abbildung 17-4). Durch die Einteilung in verschiedene Vereisungsszenarien ist auch eine Aussage über das erwartete Tropfenspektrum möglich (LEIFELD 2003). Für die definierten Vereisungsszenarien *Freezing*, *Stratiform*, *Convective* und *General* werden die Modellprofile über jedem Gitterpunkt am Erdboden nach empirischen Kriterien abgesucht. Im Szenario *Freezing* wird beispielsweise nach einer niederschlagsfähigen Wolke gesucht, deren fester Niederschlag in eine Schmelzschicht

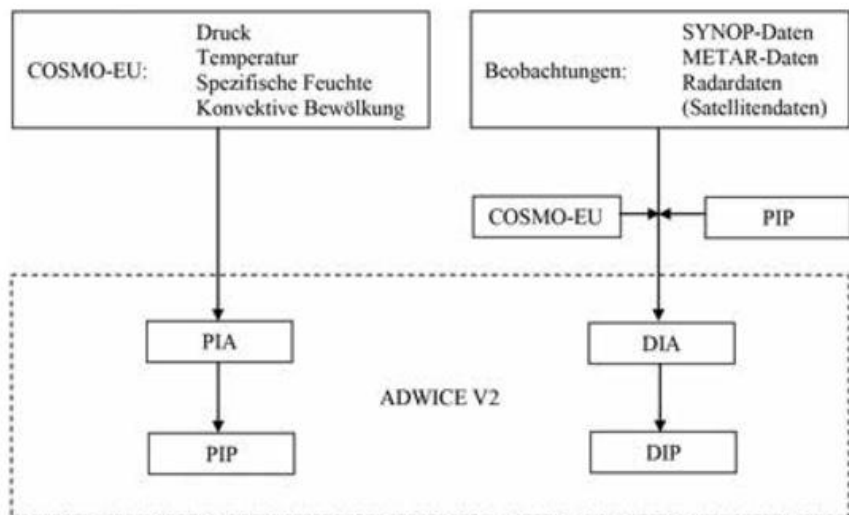


Abbildung 17-4: Schematische Darstellung des ADWICE-Algorithmus und seiner jeweiligen Eingangsdaten (adaptiert von LEIFELD 2003).

fällt („warme Nase“ im Temperaturprofil), dort schmilzt und im Anschluss weiter in eine Schicht mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt fällt. Dort werden die Niederschlagstropfen unterkühlt und fallen damit in die Kategorie der SLD. Im Szenario *Stratiform* wird das Vereisungsrisiko durch unterkühlte Nieseltropfen in flacher Stratusbewölkung betrachtet. Auch hier sind die Voraussetzungen zur Existenz von SLD gegeben. Das Szenario *Convective* betrachtet die Vereisungsrisiken in konvektiven Systemen bis in einen Temperaturbereich von  $-40^{\circ}\text{C}$ . Zur Abschätzung der vertikalen Mächtigkeit der Konvektionsbewölkung werden Eingangsdaten aus der parametrisierten Feuchtkonvektion von COSMO-EU genutzt. Zuletzt werden alle meteorologischen Bedingungen, die ebenfalls zur

Bildung von unterkühltem Flüssigwasser führen können, jedoch nicht durch die anderen drei Szenarien abgedeckt sind, im Szenario *General* zusammengefasst. ADWICE-PIA erstellt das *Prognostic Icing Product* (PIP), welches die dreidimensionale Verteilung der Vereisungsszenarien im Modellraum beinhaltet. Anschließend wird für jeden Gitterpunkt, an dem ein Vereisungsszenario identifiziert worden ist, die zu erwartende Vereisungsintensität berechnet. Diese Berechnung wird in Abschnitt 3.3.3 beschrieben.

### 3.2.2 Der Diagnosealgorithmus ADWICE-DIA

Der Vereisungsdiagnosealgorithmus ADWICE-DIA erstellt einen Überblick über die aktuelle Vereisungssituation. Hierzu werden stündlich aufgenommene Beobachtungsdaten genutzt. Diese setzen sich zusammen aus SYNOP-Daten von bemannten Beobachtungsstationen, METAR-Meldungen von europäischen Flughäfen und Radarreflektivitätsdaten des Radarverbundes. Aus den Informationen der Bodenbeobachtungen und jeweils aktuellen PIP werden zunächst die im vorigen Abschnitt beschriebenen Vereisungsszenarien vergeben. Beispielsweise kann bei einer Beobachtung von gefrierendem Regen die Modellsäule mit dem Szenario *Freezing* bestätigt werden. Aus den Bodeninformationen ist jedoch nicht die Mächtigkeit des Vereisungsraums ableitbar. Hierzu werden wiederum Modelldaten des COSMO-EU herangezogen. In Regionen, wo die Bodenbeobachtungen keinen Hinweis auf eine mögliche Vereisungsgefahr geben, wird das zur jeweiligen Stunde gültige PIP herangezogen und nach einem Abgleich mit den Beobachtungsdaten in das *Diagnostic Icing Product* (DIP) übernommen. Der Vergleich der unterschiedlichen Datenquellen soll die Miteinbeziehung widersprüchlicher Informationen vermeiden. Wurde im PIP zum Beispiel das Vereisungsszenario *Stratiform* mit unterkühltem Niesel identifiziert, die Radardaten zeigen aber am gleichen Ort ein starkes Echo, so wird im DIP das Szenario *General* an der entsprechenden Stelle gesetzt.

In Abbildung 17-4 ist ebenfalls die Verwendung von Satellitendaten im Diagnosealgorithmus angedeutet. Am IMuK wurde der Algorithmus ADWICE-DIA im vergangenen Jahr um die Verwendung von Satellitendaten erweitert (TENDEL 2013). Die hierzu nötigen METEOSAT *Second Generation* Daten geben Hinweise auf die Temperatur und Höhe der Wolkenobergrenze, den Wolkentyp und die Wolkenphase. Zum einen werden diese Daten dazu genutzt, das *Overforecasting* von ADWICE in Gebieten zu reduzieren, die von ADWICE mit einem Vereisungsszenario belegt worden sind, vom Satelliten jedoch als wolkenfrei deklariert werden. Zum anderen können durch die Interpretation der genannten Satellitenprodukte potentielle Vereisungsräume identifiziert werden, die ADWICE als nicht gefährlich einstuft. Hierzu zählen beispielsweise Wolken, die anhand von Satellitendaten als flüssig interpretiert werden und eine Temperatur an der Wolkenobergrenze unterhalb des Gefrierpunktes aufweisen. Eine Operationalisierung des erweiterten Diagnosealgorithmus wurde im Januar 2014 durch geführt.

### 3.2.3 Die Berechnung der Vereisungsintensität

Nachdem sowohl im Prognose- als auch im Diagnosealgorithmus von ADWICE die dreidimensionale Verteilung der Vereisungsszenarien im Modellraum berechnet wurde, wird an allen Gitterpunkten, an denen ein Vereisungsszenario identifiziert wurde, die zu erwartende Vereisungsintensität berechnet. Für diese Berechnung werden verschiedene Einflussgrößen aus der Modellausgabe des COSMO-EU abgeleitet. Zwei dieser Größen sind der Grad und die Schichtdicke einer eventuell vorherrschenden Eisübersättigung. Bei Übersättigung bezüglich Eis würden Eiskristalle durch Resublimation von Wasserdampf auf Kosten unterkühlter Tropfen wachsen (Bergeron-Findeisen-Prozess). Daher dient die Eisübersättigung als Hinweis für die Existenz von unterkühltem Flüssigwasser. Je höher der Grad der Eisübersättigung und je größer die Schicht, in der Eisübersättigung auftritt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für einen erhöhten Flüssigwassergehalt. Auch der Flüssigwassergehalt der Atmosphäre selbst wird zur Abschätzung der Vereisungsintensität herangezogen. Dabei bedient man sich einerseits des COSMO-EU Prognosefeldes „spezifischer Wolkenwassergehalt“, welches direkt proportional zum Flüssigwassergehalt ist. Andererseits wird eine Kondensatabschätzung über die spezifische Feuchte durchgeführt. Zuletzt wird auch die Schichtdicke eventuell vorherrschender Konvektionsbewölkung betrachtet, denn je mächtiger der Konvektionsraum, desto höher die Wahrscheinlichkeit für einen erhöhten Flüssigwassergehalt. Jeder dieser fünf Einflussgrößen wird über *Fuzzy Logic* eine Zugehörigkeitsfunktion zugeteilt und über empirische Schwellenwerte die jeweilige Vereisungsintensität abgeleitet (zusätzliche Informationen hierzu in ROLOFF 2012). Dabei ist zu beachten, dass diese Vereisungsintensität nicht flugzeugtypspezifiziert ausgegeben wird, sondern nur aus meteorologischen Parametern abgeleitet wurde. Für kleine Maschinen könnte ein Durchflug von vorhergesagten leichten Vereisungsbedingungen daher weitreichendere Folgen haben als für einen Langstreckenflieger.

### 3.2.4 Operationeller Einsatz

Der operationelle Betrieb von ADWICE richtet sich nach der Verfügbarkeit der Eingangsdaten. COSMO-EU wird täglich unter anderem um 00 und 12 UTC gestartet und benötigt etwa drei Stunden Rechenzeit. Gegen 03 beziehungsweise 15 UTC liegen die benötigten Eingabefelder vor und der Prognosealgorithmus kann gestartet werden. ADWICE-PIA läuft soweit zwei Mal. Bis zu einer Vorhersagezeit von 24 Stunden wird das PIP stündlich erstellt, zwischen 24 und 78 Stunden dann jeweils sechsstündlich. Der Diagnosealgorithmus wird dagegen stündlich gestartet, sobald alle nötigen Beobachtungsdaten in der Datenbank verfügbar sind. Es wird stündlich ein DIP erzeugt, dem eine Gültigkeit von 60 Minuten zugesprochen wird. Die Warnprodukte von ADWICE können über das Self-briefing-System *pc\_Met* von Piloten eingesehen werden. Zudem werden sie in den Luftfahrtberatungszentralen zur

Flugwetterberatung eingesetzt. Ein Beispiel für das ADWICE-Prognoseprodukt findet sich im PROMET-Artikel von Manfred Riediger.

### 3.3 Andere Vereisungswarnsysteme

Parallel zu ADWICE wurden durch andere Wetterdienste ebenfalls Vereisungswarnsysteme entwickelt. Am US-amerikanischen *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) wurden das *Forecast Icing Product* FIP (MCDONOUGH et al. 2004) zur Vorhersage von Vereisungsbedingungen und das *Current Icing Product* CIP (BERNSTEIN et al. 2005) zur Diagnose der aktuellen Vereisungssituation entwickelt. Ähnlich wie bei ADWICE ist die Vorhersage auf Modelldaten gestützt, während für die Diagnose zusätzlich Beobachtungsdaten eingebunden werden. Dabei greift man auch auf die über den USA zahlreich abgegebenen Pilotenreporte (PIREPs) zurück, mithilfe derer eine Vereisungsbeobachtung durch einen Piloten verbreitet wird.

Das französische Vereisungswarnsystem SIGMA (*System of Icing Geographic Identification in Meteorology for Aviation*, LE BOT 2003) ist ein reines Nowcastingsystem und vereint Modelldaten, Radarbeobachtungen und Satelliteninformationen zu einem Warnprodukt, das alle 15 Minuten aktualisiert wird und im Wesentlichen Frankreich abdeckt. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Warnsystemen ist durch SIGMA keine Vorhersage vorgesehen.

### 3.4 Diskussion und Ausblick

Da das Auftreten unterkühlten Wassers im Temperaturbereich von 0 bis  $-40^{\circ}\text{C}$  durch einen Mangel geeigneter Eiskeime hervorgerufen wird, muss das Auftreten aktivierter Eiskeime besser verstanden werden. Die Temperaturabhängigkeit der Aktivierung von Eiskeimen und ihre chemische als auch mikrophysikalische Vielfalt behindern bis jetzt ein umfassendes Verständnis. Ein kontinuierliches Monitoring aktivierter Eiskeime und eine Prognose derselben ist ferne Zukunftsmusik. Das Auftreten hoher Eiskristallkonzentrationen und deren schädliche Wirkung auf Triebwerke ist ein neuartiger Effekt, den man verstehen muss. Verstehen muss man auch das Bestehen der Mischphase mit gleichzeitig flüssigen und festen Wolkenpartikeln. Während ältere Literatur das erste Auftreten von festen Partikeln gleichsetzt mit verschwindendem unterkühlten Wolkenwasser, so belegen unzählige Messungen mit abbildenden Sonden die Koexistenz beider Partikelsorten. Wie sich beide an einer festen Oberfläche abscheiden, ob auftreffende Eiskristalle durch gleichzeitiges Gefrieren unterkühlten Wassers mit abgeschieden werden und wenn ja in welchem Umfang, ist eine von vielen noch zu klärenden Fragen. Meteorologen müssen ihre wolkenphysikalischen Module um die Koexistenz beider Phasen erweitern, Luftfahrtingenieure müssen die Sicherheitsrelevanz untersuchen und letztlich kostengünstige Zulassungsverfahren entwickeln, wenn eine Gefährdung nicht ausgeschlossen werden kann. Das Vereisungsrisiko wird derzeit und auch

in Zukunft an zwei Fronten bekämpft: die Vorhersage vereisungsgefährdeter Lufträume durch spezifische Wettervorhersagemodelle und durch bordeigene technische Schutzmaßnahmen. Obwohl die Entwicklung und Anwendung der Vereisungswarnsysteme mittlerweile einen Zeitraum von bis zu 20 Jahren einnimmt, ist eine Ablösung der empirischen Expertensysteme durch rein modellbasierte Vorhersagen in naher Zukunft nicht vorgesehen. LIU et al. (2011) und ROLOFF (2012) haben in ihren Untersuchungen herausgestellt, dass die Simulation des unterkühlten Flüssigwassers in den meisten Wolkenmikrophysik-Schemata der numerischen Wettervorhersagemodelle weiterhin unterschätzt wird und oftmals ebenfalls eine falsche räumliche Verteilung vorliegt. Daher steht im Fokus der Vereisungsforschung zunächst die Weiterentwicklung der bestehenden Expertensysteme durch Identifizierung und Einbindung neuer Datenquellen. Für das deutsche Vereisungswarnsystem ADWICE werden im Moment die Nutzung von Polarisationsradardaten und eine mögliche Einbindung von AMDAR-Daten geprüft. Zudem soll die bereits erfolgte Implementierung der Satellitendaten verfeinert und neu zur Verfügung stehende Größen wie zum Beispiel der effektive Radius der Wolkenpartikel sowie der Flüssigwasserspahn in den Algorithmus übernommen werden. Mit reichhaltigerer Wolkenmikrophysik, die beispielsweise auch die Vorhersage aktivierter Eiskeime enthält, werden die Expertensysteme sich von empirischen zu chemisch-physikalisch-meteorologischen und in Wettervorhersagemodellen integrierten Verfahren entwickeln.

Die technischen Schutzmöglichkeiten reichen von getriggertem Phasenübergang der Tropfen vor Auftreffen auf das Flugzeug, über eisabweisende Oberflächen zu alternativen Heizmöglichkeiten zum Beispiel durch Mikrowellen. Bordeigene Remote-Sensing-Verfahren können das meteorologische Schutzprinzip „Erkennen und Vermeiden“ im Nahbereich unterstützen. Der Bedarf einer Weiterentwicklung der Warnsysteme vor Vereisung zeigt sich nicht nur an den bedauerlicherweise immer wieder stattfindenden vereisungsbedingten Vorfällen und Unfällen, sondern auch an europäischen Initiativen wie SESAR, innerhalb derer die Vereisungsforschung eine wichtige Rolle spielt. Das breite Forschungsspektrum zur Risikominderung der Flugzeugvereisung wird daher noch einige Jahre erhalten bleiben.

### Literatur

- AEA, 2012: Recommendations for De-Icing/Anti-Icing of Aeroplanes on the Ground. Association of European Airlines, Brüssel, 27. ed., 50 pp.
- BEA, 2012: Final Report on the Accident on 1st June 2009 to the Airbus A330-203, registered F-GZCP, operated by Air France, flight AF 447 Rio de Janeiro - Paris. *Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la Sécurité de l'Aviation Civile*, Le Bourget, 223 pp.
- BERNSTEIN, B.C., MCDONOUGH, F., POLITOVICH, M.K., BROWN, B.G., 2005: Current Icing Potential: Al-

- gorithm Description and Comparison with Aircraft Observations. *Journal of Applied Meteorology* **44**, 969–986.
- BFU, 2004: Flugunfall-Untersuchungsbericht 3X286-0.01, Technischer Bericht. *Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung*, Braunschweig, 34 S.
- FAA, 1968: Aeronautics and Space. In Code of Federal Regulations, Title 14, Part 23, Appendix C. *Federal Aviation Administration*, Washington D.C., 158 pp.
- LE BOT, C., 2003: SIGMA: Diagnosis and Nowcasting of In-Flight Icing - Improving Aircrew Awareness through FLYSAFE. In Proceedings of AMS 83rd Annual Meeting, Long Beach, CA, February 9-14, 2003. *American Meteorological Society*, Boston, Massachusetts, 4 pp.
- LIU, C., IKEDA, K., THOMPSON, G., RASMUSSEN, R., DUDHIA, J., 2011: High-Resolution Simulation of Wintertime Precipitation in the Colorado Headwaters Region: Sensitivity to Physics Parameterization. *Monthly Weather Review* **139**, 3533–3553.
- LEIFELD, C., 2003: Weiterentwicklung des Nowcastingsystems ADWICE zur Erkennung vereisungsgefährdeter Lufträume. Doktorarbeit. *Institut für Meteorologie und Klimatologie, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover*, Hannover, 113 S.
- LEWIS, W., 1951: Meteorological Aspects of Aircraft Icing. In *Compendium of Meteorology*, *American Meteorological Society*, 1197–1203.
- MASON, J., 2007: Engine power loss in ice crystal conditions. *Boeing Quarterly Aero Magazine* **4**. Boeing Commercial Airplanes, Seattle, Washington, 6 pp.
- MASON, J., STRAPP, W., CHOW, P., 2006: The Ice Particle Threat to Engines in Flight. *AIAA* **2006-0206**.
- MCDONOUGH, F., BERNSTEIN, B.C., POLITOVICH, M.K., WOLFF, C.A., 2004: The Forecast Icing Potential (FIP) algorithm. In Proceedings of 20th International Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography and Hydrology, Seattle, WA, January 11 - 16, 2004. *American Meteorological Society*, Boston, Massachusetts, 6 pp.
- PARTIE, E., PETERSON, B.D., 2009: Combating Carb Ice. Safety Brief 9, *Aircraft Owners and Pilots Association*, Air Safety Foundation, Frederick, Maryland, 3 pp.
- POLITOVICH, M., 1996: Response of a Research Aircraft to Icing and Evaluation of Severity Indices. *Journal of Aircraft* **33**, 2, 291–297.
- PRUPPACHER, H.R., KLETT, J.D., 1997: Microphysics of Clouds and Precipitation. 2. ed. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, 955 pp.
- ROLOFF, K., 2012: Untersuchung zur Eignung wolkenmikrophysikalischer Parameter des numerischen Wettervorhersagemodells COSMO-EU zur Vereisungsprognose in ADWICE. Masterarbeit. *Institut für Meteorologie und Klimatologie, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover*, Hannover, 141 S.
- TAFFERNER, A., HAUF, T., LEIFELD, C., HAFNER, T., LEYKAUF, H., VOIGT, U., 2003: ADWICE: Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environments. *Weather and Forecasting* **18**, 184–203.
- TENDEL, J., 2013: Warning of In-Flight Icing Risk through Fusion of Satellite Products, Ground Observations and Model Forecasts. Doktorarbeit. *Institut für Meteorologie und Klimatologie, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover*, Hannover, 117 pp.

K. ROLOFF, B. LESCHER, S. WENZEL-HALANGK

# 18 Winterwetteroperationen am Beispiel des Verkehrsflughafens Frankfurt/Main

Winter weather operations at Frankfurt Airport

## Zusammenfassung

Im Winter wird der Flugbetrieb am Boden durch das Wetter vor große Herausforderungen gestellt. Sowohl Bewegungsflächen als auch Flugzeuge müssen von Schnee- und Eisablagerungen befreit werden. Die Organisation des operationellen Winterdienstes und der Flugzeugenteisung wird am Beispiel des Verkehrsflughafens Frankfurt/Main vorgestellt. Dabei wird einerseits die Abhängigkeit von der Wettervorhersage, die einen entscheidenden Einfluss auf die Personal- und Einsatzplanung hat, erläutert. Andererseits werden die weitreichenden Folgen des winterlichen Wetters auf die Flug- und Verkehrssicherheit aufgezeigt. Zudem erörtern die Autoren, welche Verfahren entwickelt wurden, um Beeinträchtigungen des Flugbetriebs auf ein Minimum zu reduzieren.

## Summary

Winter weather conditions challenge airport operators, airlines, crews and airport staff. Snow and ice have to be removed from airport movement areas and aircrafts. The organization of the operational winter maintenance program and the deicing of aircrafts will be presented using the example of Frankfurt Airport. The authors point out that on the one hand, personnel and resource planning are highly dependent on the winter weather forecast. Appropriate procedures on the other hand have to be developed to minimize disturbances of flight and traffic safety caused by winter weather conditions.

## 1 Winterwetterproblematik

Auch in der Wintersaison 2012/2013 wurde der Flugbetrieb am größten deutschen Flughafen Frankfurt/Main durch winterliche Wetterereignisse gestört. Am 20. Januar 2013 legte gefrierender Regen den Flugbetrieb für mehrere Stunden lahm, weil es dem verantwortlichen Personal nicht mehr möglich war, die Flugzeuge adäquat zu enteisen und eine erneute Vereisung bis zur Startfreigabe zu verhindern. Zudem wurde der Landeanflug eingestellt, da durch die fehlenden Starts keine freien Parkpositionen mehr vorhanden waren (DIE WELT 2013). Ebenfalls mit späten Wintereinbrüchen hatten die Flughäfen in West- und Zentraleuropa zu kämpfen. Am 12. März 2013 kam wegen lang anhaltenden, ergiebigen Schneefällen der Betrieb an vielen Flughäfen in Frankreich, Belgien und Deutschland faktisch fast zum Erliegen. Am Frankfurter Flughafen war der Betrieb zeitweise stark eingeschränkt, weil eine erfolgreiche Flächenenteisung nicht mehr möglich war. Durch starke Winde kam es immer wieder zu

Schneeverwehungen. Auch die Crews hatten Mühe, den Flughafen pünktlich zu erreichen, da ebenso der Straßen- und Schienenverkehr beeinträchtigt waren (SPIEGEL ONLINE 2013).

Um zu verstehen, wie es zu solch schwerwiegenden Entscheidungen wie temporären Flughafenschließungen kommen kann, muss ein Blick hinter die Kulissen geworfen werden. Wie sieht der Winterdienst an einem Flughafen aus? Welche Bereiche gehören dazu? Wie werden Bewegungsflächen und Flugzeuge von Schnee und Eis befreit? Diese Fragen soll der vorliegende Artikel beantworten. Während die Auswirkungen von Winterwettereinflüssen für die Passagiere, nämlich Verspätungen oder gar Flugstreichungen, durch die Medien hinreichend dokumentiert werden, bleiben die Folgen für den Flughafenbetreiber meist unerwähnt. Dieser muss in kürzester Zeit Entscheidungen auf Basis der Flug- und Verkehrssicherheit treffen, ohne die Effizienz des Flugbetriebs und die damit einhergehende optimale Ausnutzung der Kapazität des Flughafens außer Acht zu lassen.

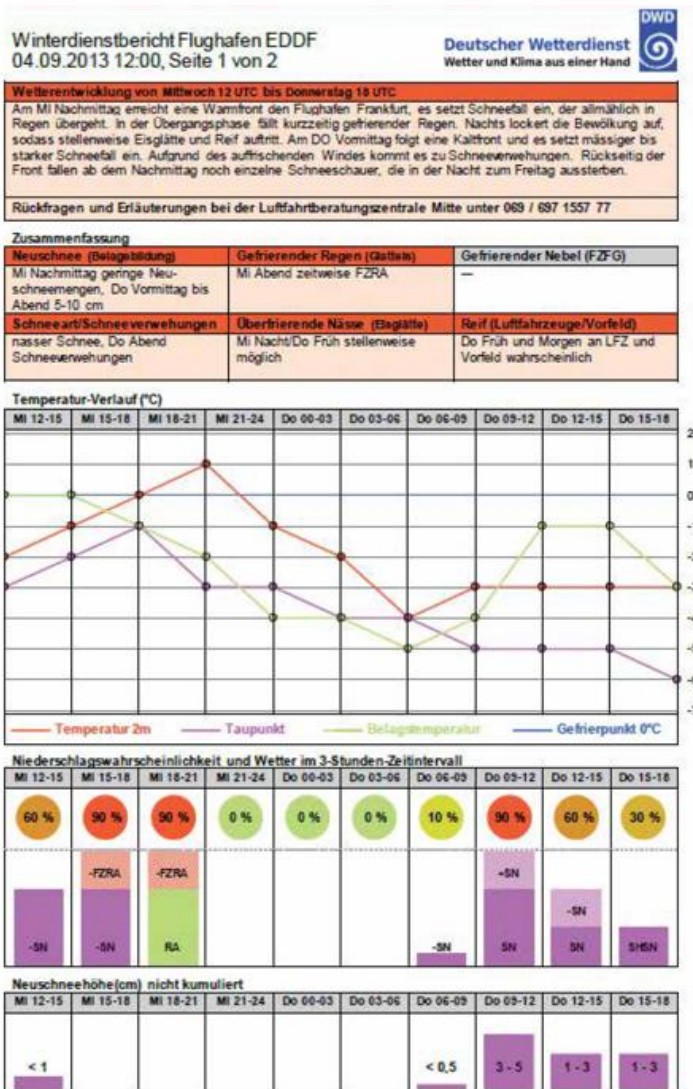


Abb. 18-1: Beispiel einer Winterdienstvorhersage des DWD (Seite 1). Die genutzten Abkürzungen werden in Abbildung 18-2 erklärt.

Der Artikel stellt zunächst die operationelle Winterdienstvorhersage des DWD vor, die in der jeweiligen Wintersaison eines Flughafens von der verantwortlichen Luftfahrtberatungszentrale (LBZ) erstellt und an die Nutzer verbreitet wird. Im Anschluss werden die Organisationsstrukturen zur Flächen- und Flugzeugenteisung am Beispiel des Verkehrsflughafens Frankfurt/Main vorgestellt, die ihrerseits spezielle Anforderungen an die Vorhersage ergeben (siehe Vorlaufzeit, Menge und Art der benötigten Enteisungsmittel, Einteilung des Schichtdienstes und so weiter). Zuletzt soll ein Ausblick auf zukünftige Herausforderungen gegeben werden.

## 2 Winterdienstvorhersage des DWD

Der Winterdienstvorhersage des DWD kommt in der flughafeninternen Wintersaison vom 01. November bis 31. März des Folgejahres eine besondere Bedeutung zu, denn ihre Güte hat einen entscheidenden Einfluss auf die Effizienz des Winterdienstes und daher auf die Kapazität des Flughafens. Die Ausgabezeiten sowie die Art und Anzahl der Vorhersageprodukte werden in Abstimmung

mit dem Kundenkreis entwickelt und zwischen dem DWD und den Verantwortlichen des Flughafens vertraglich geregelt. Standardmäßig wird eine umfangreiche Produktpalette vorgehalten, die vom Kundenkreis über eine abgeschlossene Nutzerplattform auf den Internetseiten des DWD ([www.flugwetter.de](http://www.flugwetter.de), [www.deutscherwetterdienst.de](http://www.deutscherwetterdienst.de)) abgerufen werden kann. Die Produkte sind einer ständigen Validierung unterworfen und können zeitnah bei Neuerungen angepasst werden. Speziell für die Wintermonate veröffentlicht die LBZ Mitte täglich bis spätestens 04:00 UTC, 10:00 UTC und 17:00 UTC die Winterdienstvorhersagen für den Flughafen Frankfurt. Zudem wird eine Mittelfristvorhersage über 60 Stunden erstellt. Für extreme winterliche Wetterlagen hat der DWD einen externen Arbeitsplatz bei der Vorfeldkontrolle am Flughafen Frankfurt eingerichtet, an dem ein Flugwetterberater die Vorortberatung übernimmt. In der Regel stellt der *Forecaster on Duty* den Bedarf 24 Stunden vorher fest und informiert vorab die Vorfeldkontrolle. Gemeinsam wird entschieden, ob eine Vorortberatung durchgeführt wird. Der *Forecaster on Duty* steht für Rückfragen jederzeit telefonisch zur Verfügung, bei unvorhergesehenen Wetterentwicklungen initiiert er ein situatives Telefonbriefing, an dem alle wichtigen Entscheidungsträger am Flughafen Frankfurt teilnehmen. Jeder der Teilnehmer ist berechtigt, ein Briefing einzuberufen. Insbesondere bei extremen winterlichen Lagen oder Krisen ist es ein probates Mittel, die Handlungsweisen aufeinander abzustimmen.

Die Winterdienstvorhersage beinhaltet zwei Seiten. Auf der ersten Seite (siehe Abbildung 18-1) findet man einen Mix aus Text- und Grafikausteilen. Bei den grafischen Darstellungen wurde darauf geachtet, dass alle Parameter übersichtlich und zeitlich gut einander zuzuordnen sind. Nicht kumulierte Neuschneemengen sowie die Windrichtung und Windstärke haben eine große Bedeutung für die Räumstrategien der Winterdienstverantwortlichen. Außerdem gibt es auf der zweiten Seite einen Ausblick über den Temperaturverlauf der nächsten 48 Stunden, insbesondere für die Planung der Schichten der Enteisungs- und Streudienste. Angaben zur Mittelfristvorhersage, ein Abkürzungsverzeichnis sowie die Angaben zu den Kontaktdaten schließen die Winterdienstvorhersage ab, wie in Abbildung 18-2 zu sehen ist. Die Niederschlagswahrscheinlichkeit sowie die Eintreffwahrscheinlichkeit der Art des Niederschlags werden in den Stufen 10%, 30%, 60% und 90% angegeben. Bei Vorhersagen von Glatteis, gefrierendem Niederschlag oder Schneefall mit einer Eintreffwahrscheinlichkeit von > 30% hat der diensthabende Schichtleiter der Vorfeldkontrolle die jeweils aktuelle Wettervorhersage einzuholen und, falls notwendig, das Erfordernis des Winterdienstes festzustellen.

Zusätzlich übermittelt der DWD die von der Vorfeldkontrolle übermittelten Werte für die Benutzbarkeit und den Zustand der Flugbetriebsflächen über das DWD-eigene

Meteorologische Messsystem ASDUV (Automatisches System zur Datenerfassung und Verbreitung). Hierfür nutzt der Wetterbeobachter eine über MOTNE (Meteo-logical Telecommunication Network Europe) empfangene Schlüsselgruppe, bestehend aus acht Ziffern, die er dem METAR bei Ablagerungen auf den Start- und Landebahnen zusätzlich anfügen muss. Diese Gruppe wird hinter der Routinewettermeldung, aber vor der Landewettervorhersage (TREND) verbreitet und setzt sich wie folgt zusammen:

R D<sub>R</sub>D<sub>R</sub> / E<sub>R</sub> C<sub>R</sub> e<sub>R</sub>e<sub>R</sub> B<sub>R</sub>B<sub>R</sub> (R/SNOCLO)

Beispiel: R 25<sub>L</sub> / 6 5 28 34

- R D<sub>R</sub>D<sub>R</sub> betroffene Start-/Landebahn  
(R 25L = Betriebsrichtung 250°, linke Piste)
- E<sub>R</sub> Art der Niederschlagsbedeckung  
(6 = Schneematsch)
- C<sub>R</sub> flächenmäßige Ausdehnung der Niederschlagsablagerung  
(5 = 25-50%)
- e<sub>R</sub>e<sub>R</sub> Höhe der Niederschlagsablagerung  
(28 = 28 mm)
- BRBR ermittelter Reibungskoeffizient  
(34 = 0.34, entspricht mittelmäßig)
- (R/SNOCLO) Start-/Landebahn ist aufgrund von Niederschlagsablagerungen gesperrt

Sollten über MOTNE keine erneuten Informationen verbreitet werden, ist diese Meldung maximal 24 Stunden gültig.

### 3 Abläufe zur Behandlung von Flächenkontamination

Die Bewegungsflächen eines Flughafens gelten als winterlich kontaminiert, wenn darauf loser oder kompakter Schnee, Schneematsch oder Eis zu finden sind (TCCA 2007). Diese Kontaminationen können demnach durch Niederschläge wie Schnee, Graupel und Hagel sowie Schneeregen, unterkühlten Regen und gefrierenden Regen bei unterkühlten Bewegungsflächen hervorgerufen werden. Glätteerscheinungen durch Tau oder Raureif können sich aber auch ohne feststellbaren Niederschlag bilden, insbesondere bei Strahlungswetterlagen (geringe Bewölkung, Windstille) mit unterkühlten Oberflächen (MOOK 2007). Flächenkontaminationen bewirken ein verändertes Steuerungsverhalten von Luftfahrzeugen am Boden. Dies ist zum einen auf die Änderung der Reibungswerte zurückzuführen. Hierdurch erfährt das Flugzeug eine geringere Beschleunigung bzw. eine verringerte Bremswirkung. Zum anderen kann es durch Flächenkontaminationen zur Beeinflussung der Spurtreue bei Seitenwind kommen, sodass das Flugzeug im schlimmsten

Fall von der Start- oder Landebahn abkommen kann. Ein sekundärer Effekt ist, dass durch Schneefall die Landebahnsichtweite (RVR, runway visual range) signifikant herabgesetzt wird. Die hierdurch entstehenden Folgen für Instrumentenflüge und Stafflung sind im Artikel 20 „Sichtweite“ näher beschrieben.

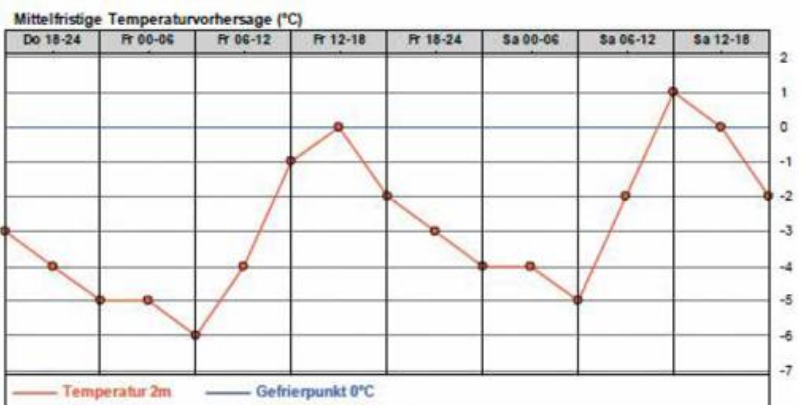
Dem Flughafenbetreiber obliegt die Verantwortung für die Gewährleistung eines betriebs sicheren Zustands der Bewegungsflächen sowie die Einleitung regelmäßiger Maßnahmen zur Beurteilung des aktuellen Zustands und zur Räumung der Bewegungsflächen (DFS 2012). Hierfür wird durch den Flughafenbetreiber ein operationeller Winterdienst eingerichtet, der die Flächenenteisung koordiniert und ausführt. Die Wintersaison am Verkehrsflughafen Frankfurt/Main betrifft den Zeitraum vom 01. November bis 31. März des Folgejahres und umfasst damit laut Definition 150 Tage (die Wintersaison 2012/2013 umfasste 154 Tage). Im Falle eines Winterdiensteinsatzes müssen alle verkehrspflichtigen Bereiche innerhalb einer angemessenen Zeit geräumt werden. Dafür müssen ausreichend Personal, Maschinen und benötigte einzusetzende Stoffe vorgehalten werden. Die Flughafenbetriebsgesellschaft des Frankfurter Flughafens, die Fraport AG, hat zur besseren Übersicht der Arbeitsabläufe das Winterdienst-Fachhandbuch (FRAPORT 2013b) erstellt.

Winterdienstbericht Flughafen EDDF  
04.09.2013 12:00, Seite 2 von 2



Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Windböen ≥ 25 Knoten

MI 12-15	MI 15-18	MI 18-21	MI 21-24	Do 00-03	Do 03-06	Do 06-09	Do 09-12	Do 12-15	Do 15-18
220°	240°	260°	260°	280°	280°	280°	280°	280°	280°
6 KT	5 KT	5 KT	5 KT	6 KT	6 KT	8 KT	12 KT	15 KT	15 KT
								25 KT	25 KT



Eine detaillierte Mittelfristvorhersage wird einmal täglich um 10 UTC erstellt und wird im Internet veröffentlicht: [www.deutscher-wetterdienst.de/gsb/mitte/mittelfrist\\_winter.htm](http://www.deutscher-wetterdienst.de/gsb/mitte/mittelfrist_winter.htm)

Abkürzungen Wetter (gemäß ICAO Doc. 8400)

" - " Intensität leicht		" * " Intensität mäßig		" + " Intensität stark	
DZ	Sprühregen	SHSN	Schneeschauer		
DZRA	Sprühregen mit Regen	SHSNRA	Schneeschauer mit Regen		
FZDZ	gefrierender Sprühregen	SN	Schnee		
FZRA	gefrierender Regen	SNRA	Schnee mit Regen		
RA	Regen	TSGR	Gewitter mit Hagel		
RASN	Regen mit Schnee	TSGS	Gewitter mit Graupel		
SG	Schneegriesel	TSRA	Gewitter mit Regen		
SHGS	Graupelschauer	TSRAGR	Gewitter mit Regen u. Hagel		
SHRA	Regenschauer	TSSN	Gewitter mit Schnee		
SHRASN	Regenschauer	TSSNRA	Gewitter mit Schneeregen		
SHRAGS	Regenschauer mit Graupel				

Kontakt:

Deutscher Wetterdienst, Luftfahrtberatungszentrale Mitte, FAC 2, Terminal 2/E, Raum 149.5112  
[www.deutscher-wetterdienst.de/gsb/mitte/winterdienst.htm](http://www.deutscher-wetterdienst.de/gsb/mitte/winterdienst.htm)  
Rückfragen und Erläuterungen unter: 069 69 71 55 777

Sign. Le

Abb. 18-2: Beispiel einer Winterdienstvorhersage des DWD (Seite 2).

Winterwetterlagen	Kategorie 1 Kein Schneefall	Kategorie 2 leichter Schneefall	Kategorie 3 Mäßiger Schneefall	Kategorie 4 Ergiebiger Schneefall	Kategorie 5 Andauernder Schneefall
Betriebsstufen	Streudienst	Mittlerer WD	Großer WD	IRREG	Schwerer IRREG
Wahrscheinlichkeit [4 %]	0-10	30	60-90	60-90	60-90
Zeitfenster [h]	/	≤ 3	≤ 3	< 6	≥ 6
Form	schwacher Schneegriesel	Schneefall	Schneefall, Schneeschaumer	Schneefall, Eisregen, Schneeschaumer	Schneefall, Eisregen, Schneeschaumer
Höhe/Schneehöhe über 3 h [cm]	/	< 1	1 - 3	3 - 5	> 5
Beschreibung	gefrierender Nebel gefrierender Sprühregen Reif, überfrierende Nässe	keine gefrierender Regen	gefrierender Regen und Sprühregen	gefrierender Regen und Sprühregen	gefrierender Regen und Sprühregen
Temperatur [°C] Luft	< 1	< 2	< 2	< 2	< 2
Temperatur [°C] Boden	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0
Windgeschwindigkeit [kn]	/	/	/	8 - 15	8 - 15

Tabelle 18-1: Winterwetterlagen der Kategorie 1 bis 5 am Verkehrsflughafen Frankfurt/Main (Ausschnitt aus FRAPORT 2013b). Die jeweiligen Eintreffwahrscheinlichkeiten werden der Winterdienst-Vorhersage des DWD entnommen. Die Abkürzung WD steht für Winterdienst, mit IRREG ist ein Flughafenbetrieb unter erschwerten Bedingungen bezeichnet.

Hierin werden auf Basis des relevanten Wetters Winterwetterlagen der Kategorie 1 bis 5 definiert, anhand derer benötigtes Material, Personal und Gerät vorgehalten sowie Einsatzpläne und Räumzeiten vorgegeben werden. Weiterhin werden im Winterdienst-Fachhandbuch die Abläufe unterschiedlicher Enteisungsmaßnahmen, die Lagerung der Enteisungsmittel für Bewegungsflächen, verschiedene Kommunikationswege während der Wintersaison und die Einsatzleitung beschrieben. Die Beurteilung des aktuellen Pistenzustands, zum Beispiel zur Beurteilung der Notwendigkeit von Präventivmaßnahmen oder zur Überprüfung bereits erfolgter Räumverfahren, geschieht durch Oberflächenzustandssensoren und Reibwertmessungen entlang der Start- und Landebahnen (MENSEN 2007). Zudem werden durch den operationellen Winterdienst Messwerte der Höhe und Art von Niederschlagsablagerungen aufgenommen. Die gesammelten Informationen bezüglich des Pistenzustands werden dem Deutschen Wetterdienst und der Flugsicherung über SNOWTAM und MOTNE mitgeteilt, damit sie über METAR und ATIS verbreitet werden können (FRAPORT 2013b).

Die Reinigung der Bewegungsflächen unterliegt einer vorgeschriebenen Priorität (DFS 2012), nach der zunächst aktive Pisten, später Rollbahnen zu aktiven Pisten und Standplatzrollgassen, Abfertigungspositionen, Vorfeldbereiche, Wartebuchten, öffentliche Zufahrtstraßen, Wege, Parkplätze und letztlich sonstige Flächen von Ablagerungen befreit werden. Im operationellen Winterdienst werden Standard-

räumverfahren durchgeführt. Situationsbedingt kann der Winterdienst-Koordinator für jede Start- und Landebahn ein bestimmtes Verfahren mit entsprechenden Räumzügen auswählen, um die kürzeste Räumzeit zu erwirken. Der Winterdienstfuhrpark in Frankfurt besteht aus

- 55 Kehrblasgeräten zur Entfernung von Schneebelägen,
- sechs Schneefräsen zur Entfernung von Schneewällen auf Start- und Landebahnen,
- 21 Streufahrzeugen zur Ausbringung von Bewegungsflächenenteisern und Sand,
- 31 Pflügen zur Verlagerung von Schneewällen (siehe Abbildung 18-3),
- vier Fahrzeugen zur Messung des Reibwerts auf den Start- und Landebahnen.

(DFS 2013). Mitarbeiter der Flughafenbetriebsgesellschaft, die zum Beispiel in den Werkstätten oder im Bodenabfertigungsdienst des Flughafens arbeiten, übernehmen die Reinigung der Abstellflächen, Fluggastbrücken und kleineren Straßen und Wege. Sie stellen jedoch nur etwa 15 % des gesamten Winterdienstpersonals dar. 85 % des im Winterdienst eingesetzten Personals sind externe Mitarbeiter, die sich grundsätzlich aus in der Region ansässigen Bauern und Landarbeitern zusammensetzen und im Winter dementsprechend verfügbar sind. Dieses Fremdpersonal übernimmt die Räumung der Start- und Landebahnen, Zu- und Abrollwege sowie sonstiger großflächiger Bereiche.



Abb. 18-3: Schneepflüge vor ihrem Winterdiensteinsatz am Verkehrsflughafen Frankfurt/Main (© Fraport AG).

Das im Winterdienst-Fachhandbuch festgelegte Konzept für die Räumung der Bewegungsflächen ist auf den Flugplan abgestimmt und berücksichtigt alle zu erwartenden An- und Abflugspitzen, um die Kapazitätseinbußen durch Winterdienstmaßnahmen so gering wie möglich zu halten. Bei Schneefall muss für die Räumung der Start- und Landebahnen mit Sperrzeiten von circa 30 Minuten gerechnet werden. Zum Schutz von Boden und Grundwasser wird in bestimmten Bereichen ausschließlich Sand zum Abstumpfen ausgebracht (FRAPORT 2013b). Während der Winterdienstmaßnahmen muss für eine störungsfreie Kommunikation mit den Towerlotsen der DFS gesorgt sein, um beispielsweise die Kreuzung des Winterdienstgerätes mit aktiven Bahnen, die Sperrung von Pisten für Räumungszwecke und die Wiederfreigabe nach erfolgreicher Räumung abzustimmen. Bei starken Beeinträchtigungen unterliegt dem Betreiber eine Teilsperrung des Flughafens, um einen Minimalbetrieb aufrecht zu erhalten sowie Streu- und Taumittel einzusparen. Die Anforderungen für Minimalbetrieb sind mindestens eine von Glätte befreite Start-/Landebahn mit jeweils einem geräumten Zu-/Abrollweg. In Situationen mit starkem Schneefall und Schneeverwehungen kann es vorkommen, dass die Mitarbeiter des Winterdienstes mit der Räumung des Schnees und der Ausbringung der Streumittel nicht hinterherkommen und somit die Maßnahmen des Winterdienstes nicht für die Wahrung der Verkehrssicherheit auf den Flugbetriebsflächen ausreichen.

#### 4 Abläufe zur Behandlung von Flugzeugkontamination

Flugzeuge können vereisen, wenn Reif, Tau, Schnee oder Regen auf (unterkühlte) Flugzeugoberflächen fallen. Man spricht von Kontaminationen auf den parkenden, abgefertigten oder rollenden Flugzeugen. (siehe Artikel 17 „Flugzeugvereisung“). Feste und gefrierende Belege verändern die Aerodynamik eines Flugzeugs, erhöhen seinen Luftwiderstand und haben

somit Einfluss auf sein Beschleunigungs- und Steigvermögen. Zudem können bewegliche Komponenten wie Ruder und Klappen festfrieren oder blockieren. Ablösende Eisschollen können Flugzeugkomponenten beschädigen sowie Abfertigungspersonal, Crew oder Fluggäste verletzen. Das von der ICAO eingeführte *Clean Aircraft Concept* besagt, dass ein Flugzeug nicht starten darf, wenn sich Eis, Schnee, Schneematsch oder Reif auf seinen Tragflächen, Propellern, Rudern oder in den Triebwerken befindet (ICAO 2000). Um dem *Clean Aircraft Concept* Folge zu leisten, ist der Pilot verpflichtet, vor Verlassen der Parkposition einen *Contamination Check* an seinem Flugzeug durchzuführen oder von einer berechtigten Person der Crew durchführen zu lassen (AEA 2012). Werden dabei Ablagerungen auf den relevanten Flächen festgestellt, so muss er sein Flugzeug zur Enteisung beim zuständigen, am Flughafen ansässigen Unternehmen (in Frankfurt: N\*ICE Aircraft Services & Support GmbH) anmelden und die gewünschten Enteisungsmaßnahmen übermitteln. Auf Basis seiner *Target Off-block Time (TOBT)* wird ihm ein Platz in der Warteliste zugewiesen. Flugzeugenteisungen können in Frankfurt auf der Vorfeldposition des Flugzeugs (voraussichtliche Enteisungsdauer: etwa 20 Minuten), auf zwei extra eingerichteten, startbahnnahen *De-Icing Pads (DP)* (etwa 10 Minuten) und auf den für Enteisung genutzten Abfertigungspositionen V153/V155 auf dem Vorfeld (etwa 15 Minuten) stattfinden (FRAPORT 2013a). Die Enteisungszeit hängt auch maßgeblich von den Witterungsbedingungen ab und kann bei schlechten Bedingungen bis zu 60 Minuten in Anspruch nehmen.

Das Enteisungspersonal wird via Bündelfunk über den neuen Auftrag informiert und an seinen Einsatzort geleitet. Bei Enteisungen auf den *De-Icing Pads* sind sechs Fahrzeuge für die symmetrische Behandlung eines großen oder zweier kleinerer Flugzeuge vorgesehen (siehe hierzu auch Abbildung 18-4). Pro Flugzeug gibt es einen so genannten *Iceman*, der die Enteisungsmaßnahmen überwacht und für die Kommunikation mit dem



Abb. 18-4: Flugzeugenteisung am Verkehrsflughafen Frankfurt/Main (© Fraport AG).

Piloten zuständig ist. Auf den Vorfeldpositionen kann die Enteisierung aus Platzgründen nur mit einer geringeren Fahrzeuganzahl durchgeführt werden, geführt von zwei Mitarbeitern. Die Enteisierung beginnt an der linken Flügelspitze, da dies die einzige Stelle ist, die der Pilot selbst einsehen kann. Das Enteisungsverfahren setzt sich aus zwei Schritten zusammen (*Two-Step-Verfahren*). Während des *De-Icings* werden Ablagerungen auf den Flugzeugoberflächen mit einem erhitzten Enteisierungsmittel entfernt. Diese Mittel haben einen hohen Wasseranteil und bieten daher keinen guten Wiedervereisungsschutz, da sie durch ihre geringe Viskosität nicht lange auf der Oberfläche verbleiben. Hierfür wird in einem zweiten Schritt, dem *Anti-Icing*, ein dickflüssigeres Fluid auf die Flugzeugoberfläche aufgetragen, das bis zum Start dort verbleibt und erst durch die während des Starts auftretenden Scherkräfte von der Flugzeugoberfläche abfließt. Ist das Flugzeug nur leicht kontaminiert, ist auch ein *One-Step-Verfahren* möglich, bei dem das *Anti-Icing* Fluid erhitzt aufgetragen wird (AEA 2012). Nach der Enteisierung wird während des so genannten *Post De-Icing/Anti-Icing Checks* überprüft, ob die Enteisungsmaßnahmen erfolgreich waren und das Flugzeug eine saubere Oberfläche aufweist. Ist dies nicht der Fall, müssen weitere Enteisungsmaßnahmen durchgeführt werden. Nach erfolgreichem *Post De-Icing/Anti-Icing Check* wird dem Piloten vom *Iceman* oder vom verantwortlichen Mitarbeiter der *Anti-Icing Code* übermittelt, in dem Informationen zum verwendeten Enteisierungsmittel, zur Dauer der Maßnahmen und zum *Post De-Icing/Anti-Icing Check* genannt werden. Hierüber kann der Pilot die so genannte Vorhaltezeit oder *Hold Over Time (HOT)*, in der das verwendete *Anti-Icing* Fluid vor einer Vereisung der Flugzeugoberfläche schützt, aus Tabellen bestimmen (N\*ICE 2009). Die Vorhaltezeit ist abhängig von der angewandten Mischung des Fluids mit Wasser, der Umgebungstemperatur und den aktuellen Wettererscheinungen (Auftreten von Reif, gefrierendem Nebel, Schneefall, unterkühltem Niederschlag, gefrierendem Niederschlag). Der Pilot muss bis zur Startfreigabe dafür Sorge tragen, dass die Vorhaltezeit nicht abläuft oder sich durch variierende Wettererscheinungen ändert (*Pre-Takeoff Check*). Hierfür muss er das aktuelle Wetter über METAR oder ATIS verfolgen und im Zweifelsfall einen *Pre-Takeoff Contamination Check* beim Vereisungsunternehmen anfordern, der eine erneute Enteisierung zur Folge haben kann (AEA 2012).

Das Enteisierungspersonal setzt sich aus Mitarbeitern der Bodenabfertigung zusammen. Für eine gezielte Einsatzplanung wäre es wünschenswert, die benötigten Mitarbeiter schon am späten Nachmittag des Vortags über den nächsten Einsatz zu informieren. Dementsprechend hohe Anforderungen werden an die Güte der Wettervorhersage des DWD gestellt. In unvorhergesehenen Situationen muss innerhalb von 45 Minuten ausreichend Personal zur Verfügung stehen, um die anfallenden Enteisungen durchführen zu können. Die Dauer der Flugzeugenteisungen ist nicht im Flugplan

berücksichtigt, da sie nicht zum routinemäßigen Ablauf gehören und für die Flugplanung nicht vorhersehbar sind (FRAPORT 2013a). Daher kann es in winterlichen Situationen schnell zu Verspätungen im Betriebsablauf kommen. In der Wintersaison 2012/2013 wurden an 128 Tagen Flugzeugenteisungen vorgenommen. Dabei waren 58 Enteisierungsfahrzeuge im Einsatz, die die Flugzeuge in durchschnittlich 9,4 Minuten erfolgreich von Eis und Schnee befreiten. In seltenen Fällen kommt es zu Wettersituationen, die eine Einstellung der Enteisungsmaßnahmen erzwingen. Grund hierfür sind starke Schneefälle oder lang anhaltender gefrierender Regen, die dazu führen, dass durch das Enteisungsunternehmen keine Garantie für die durch das *Anti-Icing-Fluid* bereitgestellte Vorhaltezeit gegeben werden kann. Ein Start mit kontaminationsfreien Flugzeugen kann in diesem Fall nicht mehr gewährleistet werden.

## 5 Ausblick

Der globale Luftverkehr weist langfristig wachsende Passagierzahlen auf. Wachsender Verkehr bedeutet für die jeweiligen Flughafenbetreiber eine erhöhte Auslastung, die früher oder später durch eine Kapazitätserhöhung ausgeglichen werden muss. Der Verkehrsflughafen Frankfurt/Main hat durch die Inbetriebnahme der Landebahn Nordwest bereits auf diesen Trend reagiert. Für den Winterdienst erfordert dies, dass zusätzliche Flächen von Kontaminationen frei gehalten werden müssen. Zudem steigt die Zahl der Flugzeuge, die in jeder Wintersaison enteist werden müssen. Zur Unterstützung einer effizienten Flächen- und Flugzeugenteisung werden Winterwetter-Nowcastings benötigt, die aktuelle Beobachtungsdaten aus Flughafennähe einbinden. Ein solches Verfahren ist im folgenden Artikel von Felix Keis und Arnold Taferner beschrieben.

## Literatur

- AEA, 2012: Recommendations for De-Icing/Anti-Icing of Aeroplanes on the Ground. *Association of European Airlines*, Brüssel, 27. ed., 50 pp.
- DFS, 2012: Ständiger Schneeplan AD 1.2-I. In: *Luftfahrt-handbuch Deutschland AIP, Deutsche Flugsicherung GmbH*, Langen, 3 S.
- DFS, 2013: Saisonaler Schneeplan SUP IFR 10 (AD). In: *Luftfahrt-handbuch Deutschland AIP, Deutsche Flugsicherung GmbH*, Langen, 5 S.
- Die Welt, 2013: Flugbetrieb auf Flughafen Frankfurt/Main eingestellt. Online-Artikel vom 20.01.2013. Abrufbar unter <http://www.welt.de/112928056>.
- FRAPORT, 2013a: Luftfahrzeugenteisungsplan Frankfurt - Wintersaison 13/14. *Fraport AG, Frankfurt Airport Services Worldwide*, 22 S.
- FRAPORT, 2013b: Winterdienst-Fachhandbuch der Fraport AG - Wintersaison 13/14. *Fraport AG, Frankfurt Airport Services Worldwide*, 76 S.

- ICAO, 2000: Manual of Aircraft Ground De-Icing/Anti-Icing Operations. Dokument 9640-AN/940, 2. Auflage ed. *International Civil Aviation Organization*, Montréal, 38 pp.
- ICAO 2002. Pavement Surface Conditions. In: *Airport Services Manual, Part 2*. Dokument 9137-AN/898, 4. Auflage. *International Civil Aviation Organization*, Montréal, 122 S.
- MENSEN, H., 2007: Planung, Anlage und Betrieb von Flugplätzen. *Springer*, Berlin, 1004 S.
- MOOK, R., 2007: Insidious ice: Basic physics makes slippery-runway issues crystal clear. *AeroSafety World* 10, Flight Safety Foundation, 24–28.
- N\*ICE, 2009: *Procedures for De-Icing/Anti-Icing of Aircraft on the Ground*. 10. Auflage ed. N\*ICE Aircraft Services & Support GmbH, Frankfurt, 44 pp.
- RÖHNER, P., 2004: *Meteorologische Analyse des Wettereinflusses auf den Flugbetrieb im Winter*. Diplomarbeit. Institut für Meteorologie und Klimatologie, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover, 102 S.
- ROLOFF, K., 2010: *Winterwetter in einem Luftverkehrsmodell*. Bachelorarbeit. Institut für Meteorologie und Klimatologie, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover, 90 S.
- SAUER, M., 2011: *Konzeption zur Implementierung von winterlichen Wetterereignissen in Schnellzeitsimulationsmodelle des Luftverkehrs*. Masterarbeit. Institut für Meteorologie und Klimatologie, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover, 165 S.
- SPIEGEL ONLINE, 2013: *Winterchaos – Frankfurter Flughafen wegen Schnees gesperrt*. Online-Artikel vom 12.03.2013. Abrufbar unter <http://www.spiegel.de/reise/aktuell/winterchaos-frankfurter-flughafen-wegen-schnee-gesperrt-a-888362.html>.
- TCCA, 2007: *Methodology for Establishing Takeoff and Landing Performance on Contaminated Runways*. Advisory Circular No. 525-001, Transport Canada Civil Aviation.

F. KEIS, A. TAFFERNER

# 19 Nowcasting von Winterwetter am Flughafen München

## Nowcasting Winter Weather at Munich Airport

### Zusammenfassung

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

### Summary

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

## 1 Winterwetter an Flughäfen

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

FMP München

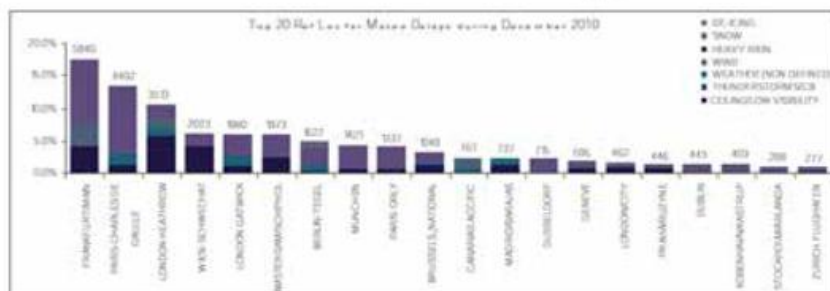
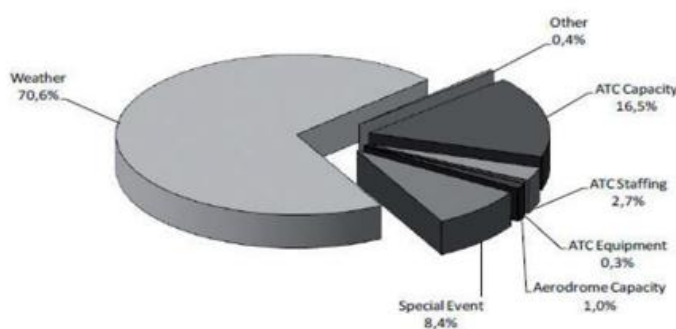


Abb. 19-1: (a) Ursachen für Verspätungen am Flughafen München 2011, Quelle: Peter Roth, DFS; (b) Ursachen für wetterbedingte Verspätungen an europäischen Flughäfen im Winter 2011/2012, Quelle: Eurocontrol - Network Operations Report, Winter 2011-2012.

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



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

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

## 2 Fuzzy-Logik

Im Gegensatz zur klassischen binären Logik, in der nur die beiden Aussagen „wahr“ oder „falsch“ zulässig sind, 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 wird im alltäglichen Umgang oft wie selbstverständlich angewandt. So wäre in der klassischen Logik auch bei wenigen Schneeflocken nur die Aussage „es schneit“ und nicht „es schneit nicht“ zulässig, während in der Fuzzy-Logik auch Aussagen wie „es schneit kaum“, „es schneit etwas“ oder „es schneit stark“ möglich sind. ZADEH (1965) entwickelte bereits vor gut 50 Jahren mathematische Modelle, um den alltäglichen sprachlichen Umgang der Fuzzy-Logik auch in mathematischen Größen ausdrücken zu können. Seitdem hat die Fuzzy-Theorie in vielen Bereichen des täglichen Lebens, wie der Regelungstechnik, der Verkehrsleittechnik und eben auch der Meteorologie Einzug gehalten.

## 3 Nowcasting System WHITE – Winter Hazards in Terminal Environment

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

### 3.1 Gebiet

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

### 3.2 Lokale Beobachtungs- und Vorhersagedaten

Die im Untersuchungsgebiet verfügbaren Daten sind:

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



Abb. 19-3: Schematisierte Karte des Untersuchungsgebiets.

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

### 3.3 Entwicklung von Winterwetterobjekten

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

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

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

Anhand Abbildung 19-4 kann der schematische Ansatz eines Winterwetterobjekts erklärt werden. Grundlage für dieses Beispiel ist ein für gefrierenden Regen typisches Profil von Temperatur und Feuchte mit einer sogenannten warmen Nase.

Entscheidend bei der Definition des Objekts ist die Einteilung der unterschiedlichen Schichten. Die oberste Schicht reicht von der Wolkenobergrenze (Ht) bis zur Oberkante der warmen Nase (H3). In dieser Schicht sind die Temperaturen stark negativ, so dass mit hoher Wahrscheinlichkeit fester oder zumindest gemischter Niederschlag zu erwarten ist. Innerhalb der warmen Nase (H3 bis H2) wird der feste Niederschlag bei entsprechenden warmen Temperaturen zu Regentropfen aufschmelzen, um anschließend in der Schicht mit negativen Temperaturen (H2 bis H1) zu unterkühlten Tropfen zu werden. Liegt diese unterkühlte Schicht am Boden auf, muss dort mit der Gefahrensituation gefrierender Regen gerechnet werden. Im Beispiel sind die Tem-

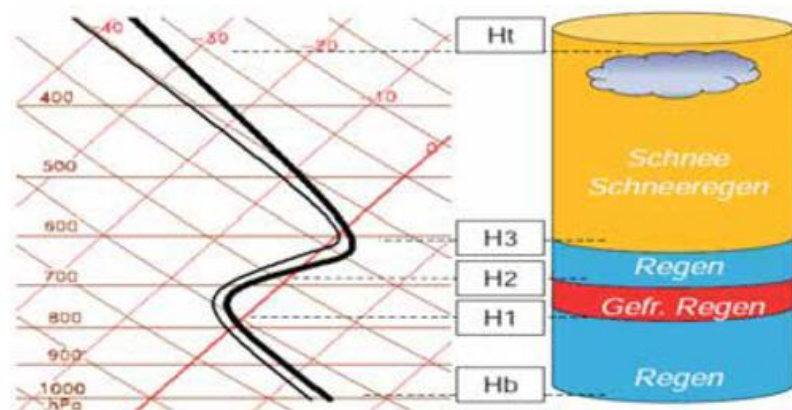


Abb. 19-4: Winterwetterobjekt (schematisch). Temperatur- und Feuchteprofil mit analysierten Niederschlagsformen.

peraturen in der bodennahen Schicht (H1 bis Hb) aber wieder positiv. Der Niederschlag kommt als Regen am Boden an.

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

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

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

### 3.4 Die Winterwetterszenarien

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

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

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

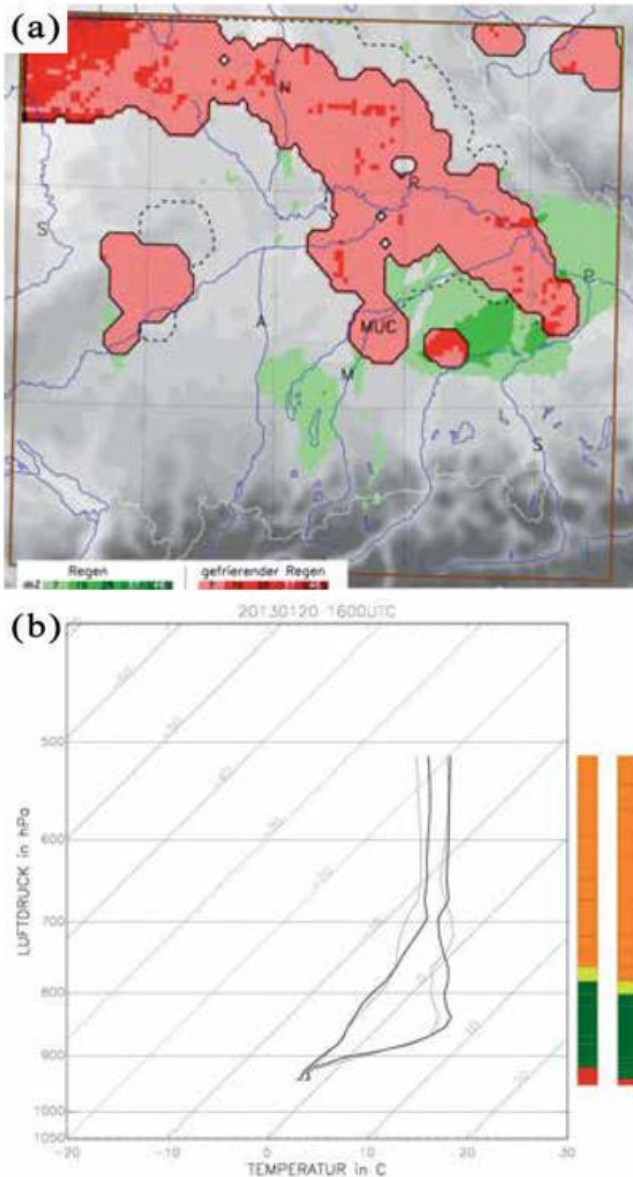


Abb. 19-5: (a) Darstellung der Winterwetterobjekte in einer bodennahen Luftschicht, Beispiel vom 20.01.2013, 16:00 UTC, Beschreibung siehe Text; (b) Skew-T-Diagramm und Winterwetterobjekte für den Flughafen München am 20.01.2013, 16:00 UTC, Beschreibung siehe Text.

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

#### 4 Analyse und Nowcasting

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

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

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

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

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

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

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

## 5 Verifikation des Systems – Die DLR Winterwetterkampagne

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

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

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

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

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

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

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

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

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

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

## Literatur

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

R. STEINACKER, S. UMDASCH

# 20 Die meteorologische Sichtweite

## The meteorological visibility

### Zusammenfassung

Die Sichtweite gilt in der Meteorologie als einer der schwierigsten atmosphärischen Parameter, sowohl was deren Erfassung durch Beobachtung oder Messung betrifft als auch besonders ihre Prognose. Die Ursache liegt in der großen räumlich-zeitlichen Variabilität dieser Größe, wobei nicht selten Diskontinuitäten auftreten. Im vorliegenden Beitrag wird nach der Diskussion verschiedener Definitionen in Zusammenhang mit der Sichtweite auf die Beobachtung und Messung näher eingegangen. Neben der horizontalen Sichtweite wird auch auf die vertikale Sichtweite beziehungsweise die Wolkenuntergrenze (*Ceiling*) eingegangen. Des Weiteren wird der momentane Stand der Technik bei der feldmäßigen Analyse und Prognose der Sichtweite dargestellt und gezeigt, wo noch entsprechender Forschungsbedarf besteht.

### Summary

Visibility belongs to the most difficult atmospheric parameters concerning its determination as well as its forecast. The reason for that lies in the large spatio-temporal variability of this quantity, sometimes there even exist discontinuities. In the present article definitions related to visibility, its observation and measurement are being discussed. Besides the horizontal visibility also vertical visibility and ceiling is examined. Furthermore, the present state of the art of analyzing and forecasting the field distribution of visibility is presented and the need for further research is shown.

## 1 Einleitung

Die Sichtweite ist ein atmosphärischer Parameter, der traditionell, sowohl bei Klimabeobachtungen als auch bei synoptischen Beobachtungen, vornehmlich wegen seiner Bedeutung für das Verkehrswesen erfasst wird. Dieser atmosphärische Parameter wurde früher fast ausschließlich durch „Augenbeobachtungen“ erfasst, indem ein Beobachter bei Vorhandensein von Sichtmarken in bekannter Entfernung, die am weitesten entfernte, in Form und Farbe gerade noch erkennbare Sichtmarke, als horizontale Sichtweite definierte und dokumentierte. Damit war die Bestimmung dieser Größe, die für den Straßenverkehr gleichermaßen wie für die Schiff- und Luftfahrt eine große praktische Bedeutung besitzt, subjektiv, vom Ausbildungsstand, der Erfahrung und nicht zuletzt vom Sehvermögen eines Beobachters abhängig. Durch die integrale Art der subjektiven Sichtweitebestimmung ist diese für einen Ort kein einzelner Wert, sondern kann eine große Richtungsabhängigkeit aufweisen. Wenn nicht ohnehin eine horizontale Sichtweite in Abhängigkeit verschiedener Richtungen dokumentiert wird, zählt laut Konvention immer die kürzeste Sichtweite aller Richtungen, als maßgeblich.

Besonders schwierig gestaltet sich die subjektive Sichtweitebestimmung naturgemäß bei Fehlen von Sichtmarken, wie dies zum Beispiel am Meer der Fall ist. Hier können große subjektive Unterschiede in der Schätzung auftreten. Im Allgemeinen wird bei der meteorologischen Sichtweite die horizontale Sichtweite gemeint. Von ähnlich großer Bedeutung wie die horizontale Sichtweite ist jedoch – vor allem für den Luftverkehr – die vertikale Sichtweite, welche insbesondere durch Wolken eingeschränkt wird. Somit ist die Höhe der Wolkenbasis oder im eingedeutschten Fachjargon auch *Ceiling* genannt, ein ebenso bedeutsamer Teil der Sichtweitebestimmung in der Atmosphäre. Für den Flugverkehr ist insbesondere beim Anflugverfahren auch die Schrägsicht von Bedeutung, die nicht einfach aus der Kombination von horizontaler und vertikaler Sichtweite bestimmt werden kann.

Heute wird die Sichtweite zunehmend „objektiv“ durch Messgeräte bestimmt. Dabei wird das Extinktionsverhalten (Absorption und Streuung) der Luft längs einer vorgegebenen Distanz gemessen. Auch das *Ceiling* wird durch das (Rück-)Streuverhalten der Atmosphäre als Funktion der Höhe bestimmt. Damit ist aber auch schon der unter-

schiedliche Ansatz zwischen subjektiver, integraler, richtungsabhängiger und der objektiven, lokalen Bestimmung der Sichtweite in nur eine Richtung klar ersichtlich. Dies ist insbesondere beim Vergleich zwischen Augenbeobachtung und Messung zu berücksichtigen. Trotz der immer besseren technischen Möglichkeiten bei der Sichtweite- und *Ceiling*-Bestimmung, wird bei kritischen Situationen deshalb bis heute gerne auf ein *man-machine-mix* zurückgegriffen.

## 2 Definitionen

Um die Sichtweitebeobachtungen und Messungen möglichst international vergleichbar zu machen, hat die Meteorologische Weltorganisation (WMO 1996) eine Reihe von Begriffsbestimmungen und Definitionen publiziert. In Anlehnung an diese WMO-Anleitungen finden sich solche Definitionen und Vorschriften für den Flugverkehr auch in Publikationen der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation ICAO. Außerdem besitzen viele nationale Wetterdienste ihre eigenen, auf das jeweilige Klimagebiet zugeschnittenen Anleitungen, wie Sichtweite und *Ceiling* bestimmt werden können. Die im Folgenden definierten Sichtweitegrößen haben im Deutschen keine eindeutig abgegrenzten Begriffsbezeichnungen. Daher sind in Klammer die englischen Ausdrücke angegeben.

Die meteorologische Sichtweite (*Meteorological Optical Range*, MOR) ist laut WMO als „Länge des Pfades in der Atmosphäre definiert, die benötigt wird, um den Lichtstrom eines gerichteten Strahls einer weißglühenden Lampe bei einer Farbtemperatur von 2700 K, auf fünf Prozent seines ursprünglichen Wertes zu reduzieren“ (WMO 1996). Der Lichtstrom wird hierfür anhand der photometrischen Leuchtkraftfunktion der *International Commission on Illumination* berechnet.

Die eher auf subjektive Beobachtung abgestimmte meteorologische Sichtweite (*Visibility*, VIS) „ist tagsüber als die größte Distanz definiert, bei der ein ausreichend großes, am Boden befindliches, schwarzes Objekt noch gesehen und erkannt werden kann, wenn es im Tageslicht gegen den Horizont beobachtet wird. Nachts ist die meteorologische Sichtweite diejenige Distanz, bei der ein solches Objekt noch erkannt werden könnte, würden die allgemeinen Beleuchtungsverhältnisse auf das normale Tageslichtniveau angehoben werden“ (WMO 1996).

Eine weitere Definition für die meteorologische Sichtweite (*Visual Range*, VR) ist durch die WMO definiert: „Sie ist die Distanz, bei der der Kontrast eines gegebenen Objekts zu seinem Hintergrund genau gleich dem Schwellwert eines Beobachters ist“ (WMO 1996). Angewandt wird diese Definition vor allem an Flughäfen für die Bestimmung der *Runway Visual Range* (RVR). Die Pistensichtweite (RVR) ist „die Entfernung, über die ein Pilot aus einem Flugzeug auf der Mittellinie einer Landebahn die Bodenmarkierungen oder die Lichter an der Piste sehen kann“ (WMO

1996). Die RVR wird bei geringen Sichtweiten bis 1500 m oder 2000 m gemeldet.

Des Weiteren wird in der Luftfahrt eine spezielle Sichtweite (*Visibility for aeronautical purposes*, VIS-AERO) definiert, wobei VIS-AERO durch den größeren Wert der beiden Bestimmungsmerkmale gegeben ist:

1. Die größte Distanz, bei der ein ausreichend großes, schwarzes Objekt nahe dem Boden noch gesehen und erkannt werden kann, wenn es gegen einen hellen Hintergrund beobachtet wird.
2. Die größte Distanz, bei der Lichter nahe 1000 cd gegen einen unbeleuchteten Hintergrund gesehen und identifiziert werden können.

In der Luftfahrt wird der Begriff der vorherrschenden Sichtweite (*prevailing visibility*) verwendet. Sie ist als Wert der beobachteten VIS-AERO definiert, der mindestens über dem halben Horizontkreis oder mindestens auf der halben Fläche des Flugplatzes erreicht oder übertroffen wird.

Somit kann MOR als die strenge Basis für eine objektive, physikalisch basierte Sichtweitebestimmung gesehen werden, während VIS und VR beziehungsweise RVR auf die subjektiven, physiologischen Eigenheiten eines Beobachters (beziehungsweise Piloten) abgestimmt sind.

### 2.1 Wolkenuntergrenze und Ceiling

„Der unterste Bereich der Wolke, in der die Sichttrübung entsprechend eines Übergangs von klarer Luft oder Dunst zu Wassertröpfchen oder Eiskristallen, eine signifikante Änderung im Rückstreuoeffizienten bewirkt, definiert die Wolkenuntergrenze. In der Luft unter der Wolke zeigen die Partikel, die die Trübung bewirken, eine gewisse spektrale Selektivität, während es in der Wolke selbst nahezu keine Selektivität gibt; der Unterschied ist auf die verschiedenen Tröpfchengrößen zurückzuführen. Die Höhe der Wolkenuntergrenze ist als Höhe über Bodenniveau definiert. Für eine Station an einem Flughafen ist das Bodenniveau als die offizielle Höhe des Flugplatzes definiert.“ (WMO 1996).

Für den Flugverkehr muss die Wolkeninformation für den Flugplatz und seine unmittelbare Umgebung repräsentativ sein, bei Reports, die die Landung betreffen, für den Approach-Bereich. Beim Präzisionsanflug sollten die Angaben für den Ort der Mittelmarkierung repräsentativ sein, oder, wenn eine solche nicht verwendet wird, für einen Punkt etwa 900 bis 1200 m von der Pistenschwelle entfernt. Beim Präzisionsanflug sollte zudem für die Höhenangabe die Höhe über der Pistenschwelle angegeben werden.

Wenn der Himmel bei Nebel, Schneetreiben oder ähnlichen Erscheinungen nicht sichtbar ist, wird die Wolkenuntergrenze in den Wettermeldungen (METAR, SYNOP, etc.) durch die vertikale Sichtweite ersetzt. „Die vertikale Sichtweite ist definiert als die maximale Distanz, bei der ein Beobachter ein Objekt auf derselben Vertikalen wie

er selbst, darüber oder darunter, sehen und identifizieren kann“ (WMO 1996).

Als *Ceiling* oder Hauptwolkenuntergrenze wird die Untergrenze der niedrigsten Wolkenschicht, die mehr als die Hälfte des Himmels bedeckt, bezeichnet. In der ICAO-Definition (ICAO 2005) wird zusätzlich gefordert, dass diese Höhe unter 6000 m liegt.

### 3 Physikalische Grundlagen

Die Atmosphäre wird zwar meist als transparentes Medium bezeichnet, allerdings gibt es Prozesse, die elektromagnetische Strahlung auf dem Weg durch die Atmosphäre dämpfen und somit (im sichtbaren Spektralbereich) die Sichtweite begrenzen.

Elektromagnetische Strahlung kann in Wechselwirkung mit Materie absorbiert und gestreut werden. Der von diesen Prozessen unbehelligte Teil wird transmittiert. Während für eine Strahlrichtung gilt, dass die Summe aus Absorptivität, Reflektivität und Transmissivität eins (beziehungsweise 100%) beträgt:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1)$$

wobei  $\alpha$  der Absorptionskoeffizient,  $\rho$  der Reflexionskoeffizient und  $\tau$  der Transmissionskoeffizient ist, muss für die Beschreibung der Streuung die Richtungsabhängigkeit mit berücksichtigt werden.

Die Abschwächung elektromagnetischer Strahlung durch Absorption und Streuung wird als Extinktion bezeichnet. Dabei folgt die Abschwächung dem Beersches Gesetz:

$$L = L_0 \exp[-\sigma] \quad (2)$$

wobei  $L$  die Radianz am Ende einer durchstrahlten Strecke und  $L_0$  die Radianz am Beginn dieser Strecke bedeutet und

$$\sigma = \int_0^s k(\zeta) d\zeta \quad (3)$$

die sogenannte optische Dicke darstellt. Die optische Dicke ist wiederum vom dichteabhängigen Extinktionskoeffizient  $k$  als Funktion des durchstrahlten Wege  $s$  und der (geometrischen) Weglänge  $s$  selbst, gegeben. Damit wird klar, dass für die Bestimmung der Abschwächung der elektromagnetischen Strahlung längs einer durchstrahlten Luftstrecke die Variation des Extinktionskoeffizienten einen maßgeblichen Einfluss ausüben kann. Bei signifikanter räumlicher Variation wird die Sichtweite somit eine ebenso signifikante Varianz und Richtungsabhängigkeit aufweisen.

Ist sowohl  $k$  als auch  $\rho$  längs einer durchstrahlten Strecke konstant, so schwächt sich die direkt von Gegenständen abgestrahlte beziehungsweise reflektierte Radianz exponen-



Abb. 20-1: Abhängigkeit des Kontrasts von Objekten in Abhängigkeit der Entfernung (Foto: R. Steinacker).

tiell ab (siehe Abb. 20-1). Im Flugverkehr kann eine starke Abhängigkeit der optischen Dicke einer Dunst- oder Nebelschicht vom Sichtwinkel auftreten, siehe Abb. 20-2.

Eine weitere Komplikation wird durch die Abhängigkeit der Wechselwirkung von Strahlung mit Materie von der Wellenlänge hervorgerufen. Korrekterweise müssen die Gleichungen (1) bis (3) in ihrer spektralen Form verwendet werden:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (4)$$

$$L_\lambda = L_{\lambda,0} \exp[-\sigma_\lambda] \quad (5)$$

$$\sigma_\lambda = \int_0^s k_\lambda(\zeta) d\zeta \quad (6)$$

Reine Luft besitzt eine extrem geringe Absorptivität, die Streuung ist allerdings speziell für kurze Wellen im solaren elektromagnetischen Spektrum bedeutsam, weil sie dem Rayleighschen Gesetz folgt

$$k_\lambda \propto \lambda^{-4} \quad (7)$$

Dieses Streuungsgesetz gilt dann, wenn die Größe der streuenden Partikel sehr viel kleiner als die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung ist, was bei der Molekülgröße der in der Atmosphäre befindlichen Gase (wesentlich kleiner als ein nm) im Vergleich zur Wellenlänge des

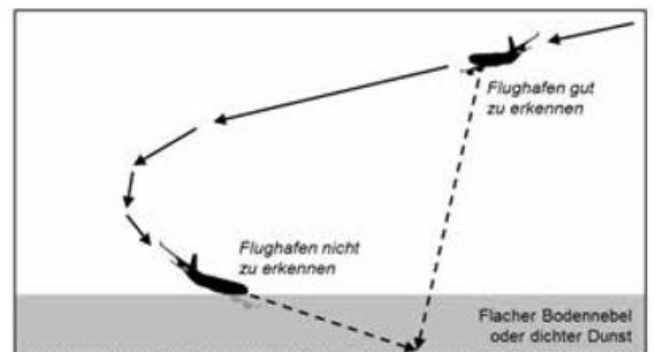


Abb. 20-2: Sichtbarkeit oder Nichtsichtbarkeit eines Flughafens in Abhängigkeit des Sichtwinkels

sichtbaren Lichtes (mehrere 100 nm) jedenfalls erfüllt ist. Gleichung 7 ist die Begründung, warum wir bei wolkenfreiem Himmel und klarer Luft den Himmel blau, und die Sonne gelb bis rot wahrnehmen.

Für die Begrenzung der Sichtweite spielt die Rayleigh-Streuung eine untergeordnete Rolle. Eine völlig klare (aerosolfreie) Atmosphäre würde eine horizontale Sichtweite von etwas mehr als 300 km erlauben (BOHREN und CLOTHIAUX 2006). Das ist eine Strecke, bei der die Erdkrümmung bereits eine deutliche Rolle spielt. Bei einer solchen Sichtweite müsste ein Gegenstand bereits etwa so hoch sein wie die höchsten Himalaya-Berge (rund 8 km) um von einem Standort in einer Ebene geometrisch noch gesehen zu werden, oder aber, ein Beobachter müsste sich in eben dieser Höhe befinden, um einen Gegenstand in der Ebene in rund 300 km Entfernung gerade noch wahrnehmen zu können.

Die größten Sichtweiten werden deshalb aus der Antarktis berichtet, wo in extrem klarer Luft schneefreie Berge (das fast 5000 m hohe Vinson-Massiv in der Westantarktis) im Kontrast zu den weißen Schneeflächen Sichtweiten im Bereich mehrerer hundert Kilometer erlauben. Dabei dürfte eine verstärkte Refraktion (nach unten gebogene Lichtstrahlen) auch Berge von geringerer Höhe wahrnehmbar machen.

Die für die meteorologische Praxis stärker eingeschränkte Sichtweite wird in der Atmosphäre fast ausschließlich von Aerosolpartikeln, Wolken- beziehungsweise Nebeltröpfchen und Eiskristallen, sowie von fallenden oder aufgewirbelten Hydrometeoren verursacht. Da diese Partikel im Größenbereich ihrer Radien von  $\mu\text{m}$  (Aerosol) bis mm (Regentropfen) oder gar cm (Schneeflocken, Hagel) angesiedelt sind, gilt nicht mehr das Rayleighsche Streuungsgesetz sondern das Streuungsgesetz nach Mie (Radius der Streupartikel ähnlich oder größer als die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung)

$$k_\lambda \propto \lambda^{-1.3} \tag{8}$$

was eine wesentlich schwächere Abhängigkeit von der Wellenlänge bedeutet. Der Faktor 1,3 im Exponenten wird als gute mittlere Näherung für Aerosole angenommen (REUTER et al. 2001), kann jedoch je nach Partikeleigenschaften etwa im Bereich von 0 bis 2 schwanken. Somit führt die Mie-Streuung im schmalen sichtbaren Bereich des Lichtes zu einem weißlichen Streulicht. Im Gegensatz zur Rayleigh-Streuung ist dabei die Streuung nicht isotrop sondern weist eine deutliche Richtungsabhängigkeit auf. Vorwärts- und Rückwärtsstreuung dominieren meist über die seitlichen Richtungen. Das bedeutet aber, dass selbst bei räumlich konstanter Verteilung von Streupartikeln für einen in Richtung einer flach stehenden Sonne blickenden Beobachter beziehungsweise auch einen Beobachter mit der Sonne im Rücken, die Sichtweite wesentlich schlechter sein kann als für einen quer zur Sonnenstrahlung blickenden Beobachter.

Die Sichtbarkeit eines Objekts wird nicht nur durch die Abschwächung des Lichts auf dem Weg durch die Atmosphäre beschränkt, sondern auch durch das an den Partikeln zwischen Objekt und Beobachter in Richtung des Beobachters gestreute Licht.

Aus dem oben Gesagten kann leicht abgeleitet werden, dass die Sichtweite zu den am stärksten räumlich beziehungsweise richtungsabhängig und zeitlich variierenden Parametern der Atmosphäre gehört und somit auch ihre Beobachtung, Messung, Analyse und Vorhersage zu den schwierigsten Aufgaben der angewandten Meteorologie zählt.

#### 4 Die besondere Rolle der Runway Visual Range im Flugverkehr

Die RVR ist laut Definition entweder die Sichtbarkeit von Lichtquellen oder die Sichtbarkeit von Objekten, je nachdem welcher Wert größer ist. Wird die RVR an (schwarzen) Objekten gemessen, so wird sie über Koschmieders Gesetz (KOSCHMIEDER 1924) berechnet und entspricht der MOR.

$$C_t = e^{-kR} \tag{9}$$

mit

$R = \text{RVR [m]}$ ,

$k = \text{atmosphärischer Extinktionskoeffizient [m}^{-1}\text{] und}$

$C_t = \text{Kontrastschwellewert, angenommen als } 0,05$ .

Bei der Messung an Lichtquellen müssen die Beleuchtungsstärke der Umgebung und die Leuchtstärke der Lichtquelle eingehen. Die Berechnung erfolgt mit Allards Gesetz (ALLARD 1876):

$$E_t = (I/R^2) e^{-kR} \tag{10}$$

mit

$E_t = \text{Schwellwert der Beleuchtungsstärke [lx] am Auge des Beobachters, die überschritten werden muss, damit die Lichtquelle sichtbar ist,}$

$R = \text{RVR,}$

$k = \text{atmosphärischer Extinktionskoeffizient [m}^{-1}\text{] und}$

$I = \text{Lichtstärke der Pistenbeleuchtung [cd]}$ .

Bei Dunkelheit, also einer geringen Umgebungsbeleuchtungsstärke können Lichtquellen über weitere Distanzen gesehen werden als bei Tageslicht. Abbildung 20-3 illustriert das Verhältnis der RVR aus Allards Gesetz im Vergleich zur MOR aus Koschmieders Gesetz. Mit einem angenommenen Schwellwert der Beleuchtungsstärke von  $10^{-6} \text{ lx}$  nachts, ist die RVR im zu meldenden Wertebereich nachts um einen Faktor von etwa 2 bis 5 höher als die MOR. Bei  $E_t = 10^{-4} \text{ lx}$  (mögliche Bedingungen tagsüber), ist bei einer MOR von 1000 m, die RVR ungefähr 1,3 mal so hoch. Fällt die Kurve jedoch unter den Faktor 1, so wird, wie erwähnt, der Wert der MOR für die Meldung der RVR verwendet. Instrumentelle RVR-Messsysteme sind zu-

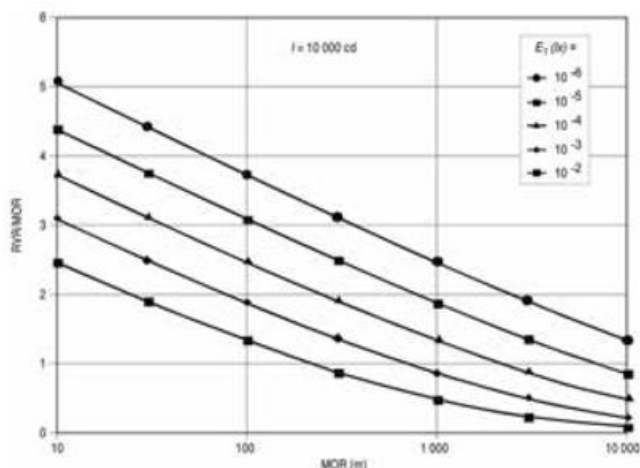


Abbildung 20-3: Verhältnis RVR/MOR aus Allards Gesetz. Quelle: ICAO (2006)

sätzlich zum Messgerät, das den Extinktionskoeffizienten bestimmt (im Allgemeinen Transmissometer) auch mit einem Sensor für die Umgebungsbeleuchtungsstärke ausgestattet, um die richtige Berechnung zu gewährleisten.

Die RVR soll theoretisch die Sicht des Piloten aus dem Cockpit wiedergeben. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Größe von verwendeten Flugzeugen variiert die tatsächliche Höhe des Piloten im Bezug zur Landebahn jedoch sehr stark. Als mittlere Augenhöhe wurde ursprünglich 5 m vorgeschlagen, die empfohlene Messhöhe laut ICAO (2006) ist bei 2,5 m. Die Lichtstärke, die bei einem Piloten auf 5 m Höhe ankommt unterscheidet sich bei gleichmäßigen Sichtverhältnissen nicht signifikant von der bei 10 m Höhe. Ungleiche Repräsentativität der RVR für die verschiedenen Beobachterhöhen tritt jedoch auf, wenn die Sichtweite mit dem Abstand zum Boden variiert.

Die RVR ist zusammen mit der Wolkenuntergrenze für die Airlines und Flughafenbetreiber von ökonomischer Bedeutung, da sie die Betriebsstufen (Kategorien, CAT) für mit dem Instrumentenlandesystem (ILS) durchgeführte Anflüge festlegt. Je nach technischer Ausstattung des Flugplatzes und des Flugzeugs können Landungen bei unterschiedlich schlechten Sichtbedingungen, gegeben durch die CAT-Stufe, durchgeführt werden. Neben der RVR werden diese Sichtbedingungen auch durch die *Decision Height* bestimmt. Als *Decision Height* oder Entscheidungshöhe, wird die kritische Höhe bezeichnet, bei der der Pilot ausreichenden Sichtkontakt mit der Landebahn haben muss, damit die Landung nicht abgebrochen werden muss. Es darf also keine Wolkendecke unter der *Decision Height* liegen. Tab. 20-1 zeigt die Schwellwerte der RVR und der *Decision Height* für die verschiedenen CAT-Betriebsstufen gemäß der ICAO-Definition (ICAO 2010). Die anzuwendenden Schwellwerte können je nach Region von den angegebenen leicht abweichen. Sehr viele

internationale Flughäfen und Flugzeuge und sind für Landungen bei CAT IIIb gerüstet und zertifiziert, das heißt Landungen können auch bei sehr eingeschränkten Sichtbedingungen durchgeführt werden. Für CAT I-Betrieb ist die Messung der RVR nur an der Aufsetzzone der Landebahn notwendig, für CAT II sind zwei Sensoren pro Piste gefordert, für CAT III drei. Bei CAT II und III wird die Landung in der Regel durch die Autolandfunktion des Autopiloten durchgeführt. Landungen bei CAT IIIc also 0 m Sicht kommen kaum vor. Grund dafür ist jedoch nicht die Schwierigkeit der Landung, sondern die Gefahr von Kollisionen bei der Bewegung auf den Rollbahnen am Boden. Die möglichst genaue Messung der Pistensichtweite ist für die richtige Bestimmung der Kategorie und somit für Flugsicherheit und Effizienz sehr wichtig.

### 5 Zusammenhang zwischen Niederschlag und Sichtweite

Abb. 20-4 aus GULTEPE und MILBRANDT (2010) zeigt Messungen der Sichtweite gegen die Regenrate als rote Punkte. Die Daten wurden in den Sommern 2006 und 2007 an der Ostküste Kanadas (Lunenburg, Nova Scotia) mit Vaisala *Present Weather Sensors* FD12P aufgenommen. Fester Niederschlag wurde ausgeschlossen, Nieseln getrennt betrachtet. Zudem wurde versucht, die Effekte von Dunst und hoher Luftfeuchtigkeit möglichst herauszunehmen. Die Streuung der Sichtweitemessungen ist sehr hoch, was darauf hinweist, dass die Abhängigkeit von der Niederschlagsrate nicht eindeutig ist, sondern von weiteren Faktoren wie der Tröpfchenkonzentration, der Dichte, etc. abhängt. GULTEPE und MILBRANDT (2010) schlagen Wahrscheinlichkeitsabschätzungen basierend auf der Ausgleichskurve sowie den Perzentilen der Punktwolke vor. Abb. 20-4 zeigt außerdem, dass Nieseln bei gleicher Regenrate im Mittel die Sichtweite stärker verringert als Regen. Zusätzlich sind errechnete Zusammenhänge, abgeleitet aus den Studien von MARSHALL und PALMER (1948) und SEKHON und SRIVASTAVA (1971) eingezeichnet. Dafür wurden die aus den beiden Arbeiten ermittelten Beziehungen zwischen Flüssigwassergehalt und Niederschlagsrate anhand einer Formel von STALLABRASS (1985) mit der Sichtweite verbunden. Die Ergebnisse zeigen für Regenraten unter 2 bis 3 mm h<sup>-1</sup> sehr hohe Abweichungen von den mittleren Messungen.

Schneefall bewirkt bei gleicher Niederschlagsrate oft eine stärkere Einschränkung der Sichtweite als Regen (GULTEPE und ISAAC 2006). Abb. 20-5 aus RASMUSSEN et

Betriebsstufe	RVR	Decision Height
CAT I	≥ 550 m (oder Sichtweite ≥ 800 m)	≥ 60 m (200 ft)
CAT II	≥ 300 m	≥ 30 m (100 ft) bis < 60 m (200 ft)
CAT IIIa	≥ 175 m	< 30 m (100 ft)
CAT IIIb	≥ 50 m bis < 175 m	< 15 m (50 ft)
CAT IIIc	Keine RVR	Keine Decision Height

Tab. 20-1: Betriebsstufen gemäß ICAO 2010. Wenn DH und RVR in verschiedene Betriebsstufen fallen, wird die höhere verwendet.

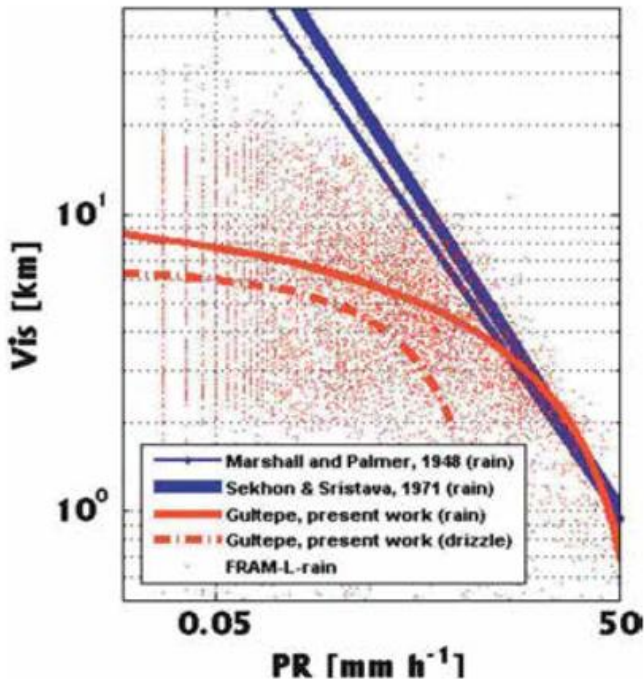


Abb. 20-4: Beziehung Sichtweite-Regenrate. Vaisala FD12P-Messungen (rote Punkte). Ausgleichskurven für Regen (rot durchgezogen) und Nieseln (rot gestrichelt). Abgeleitete Beziehungen basieren auf MARSHALL und PALMER (1948) und SEKHON und SRIVASTAVA (1971) modifiziert mit einer Gleichung von STALLABRASS (1985) (blau). Quelle: GULTEPE und MILBRANDT (2010).

al. (1999) zeigt Messdaten einer Kampagne von 1994/95 nahe Boulder, Colorado, USA und sehr unterschiedliche Anpassungskurven aus verschiedenen älteren Studien. Die sehr hohe Variation der Sichtweite bei gleicher Schneefallrate zeigt sich auch in neueren Messdaten (GULTEPE und ISAAC 2006, nicht gezeigt) und erklärt sich durch die starken Unterschiede in der Ausprägung der Kristalle (vor allem Fläche-zu-Masse-Verhältnis und Geschwindigkeit), welche insbesondere durch Form der Schneeflocken, Nässe sowie dem Ausmaß von Akkretion und Aggregation bestimmt wird.

Die Sichtweite weist also einen deutlichen Trend zu niedrigeren Werten bei höherer Niederschlagsrate auf, wobei die Mittel für die verschiedenen Niederschlagsarten deutlich unterschiedlich sind. Selbst für Fälle, in denen der Niederschlag der bestimmende Faktor für die Sichtweitereduktion ist, reicht die Niederschlagsrate alleine jedoch nicht aus, um die Sichtweite zu quantifizieren, da die Verteilung der physikalischen Eigenschaften

ten der Tröpfchen beziehungsweise Kristalle einen sehr großen Einfluss hat.

Neben der Wirkung des Niederschlags und den bereits besprochenen Einflussfaktoren auf die Sichtweite wurde kürzlich beispielsweise auch die Sichtweitereduktion durch Vulkanasche untersucht (WEINZIERL et al. 2012). Eine visuelle Abschätzung der Gefahr könnte die kurzfristige Reaktion des Piloten bei vorhandenen Aschewolken verbessern. In der Studie von (WEINZIERL et al. (2012) wurde die Sichtweite in Vulkanasche anhand dreidimensionaler Monte Carlo-Simulationen des Strahlungstransports untersucht. Es zeigte sich, dass die Sichtweite stark von der Hintergrundhelligkeit und dem Aerosoltyp abhängt.

## 6 Bestimmungs- und Messmethoden der Sichtweite und des Ceilings

### 6.1 Visuelle Bestimmung der Sichtweite

Bei bemannten Stationen wird die Sichtweitebestimmung tagsüber durch eine Vielzahl von Objekten (Gebäude, Bäume, Türme, Masten etc.) in unterschiedlichen aber bekannten Entfernungen vom Standort ermöglicht. Solche Objekte sollten nicht nur in einer Richtung sondern in mehreren Sektoren definiert sein, um eine Richtungsabhängigkeit der Sichtweite erfassen zu können. Damit ist es für den geübten Beobachter möglich, die Sichtweitebestimmung nach den 85 quasilogarithmisch angeordneten Klassen im SYNOP-Schlüssel durchzuführen (unter 100 m, dann weiter in 100-m Stufen bis 5 km, darüber weiter in 1-km-Stufen bis 30 km, darüber dann in 5 km Stufen bis 70 km und als höchste Stufe mehr als 70 km). Wesentlich schwieriger ist eine Sichtweitebestimmung

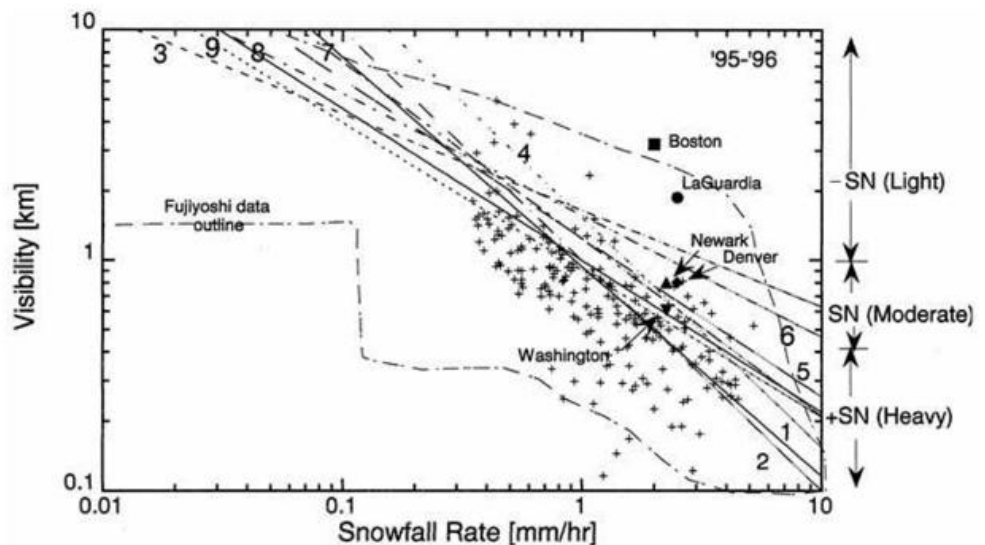


Abb. 20-5: Beziehung Sichtweite-Schneefallrate. Messdaten (Plus Zeichen); Ältere abgeleitete Zusammenhänge: POLJAKOVA und TRETJAKOV (1960), Linie 1 ( $V = 0.945S - 0.91$ ); LILLESÆTER (1965), Linie 2 ( $V = S - 1$ ); MELLOR (1966), Linie 3 ( $V = 1.65S - 0.42$ ); WARNER und GUNN (1969), Linie 4 ( $V = 1.54S - 1$ ), O'BRIEN (1970), Linie 5 ( $V = 1.25S - 0.69$ ); BISYARIN et al. (1997), Linie 6 ( $V = 1.57S - 0.52$ ); MUENCH und BROWN (1977), Linie 7 ( $V = 1.24S - 0.77$ ); FUJIYOSHI et al. (1983), Linie 8 ( $V = S - 0.66$ ); Stallabrass (1985), Linie 9 ( $V = 0.915S - 0.64$ ). Fette Symbole zeigen Werte für einzelne Unfälle. Quelle: RASMUSSEN et al. (1999).

bei Fehlen von Sichtmarken, wie dies am offenen Meer der Fall ist. Hier kann eine Schätzung nur durch die wesentlich gröbere Einteilung des Kurzschlüssels der Sichtweiten (10 Stufen, von weniger als 50 m bis über 50 km) durchgeführt werden. Um bei Flughäfen die Sichtweitebeobachtung im kritischen Bereich besonders genau durchführen zu können, werden meist entlang der Landebahnen Sichtmarken angebracht.

In der Nacht wird die Sichtweitebestimmung mittels Lichtquellen mit bekannter, richtungsunabhängiger Intensität durchgeführt. Die Sichtweite für diese Lichtquellen kann als Funktion der Umgebungsleuchtdichte ausgedrückt werden. Bei Flughäfen werden Lichtquellen mit bekannter, vorgegebener Leuchtstärke verwendet.

## 6.2 Instrumentelle Messung der Sichtweite

### 6.2.1 Messung des Extinktionskoeffizienten

Als geläufigste Methode wird die Messung des Extinktionskoeffizienten mit einem Transmissometer wie in Abb. 20-6 durchgeführt. Hierbei wird die Abschwächung eines gerichteten, horizontalen Lichtstrahls längs einer bekannten Entfernung zwischen Sender und Empfänger bestimmt.

Telephotometrische Instrumente vergleichen die scheinbare Luminiszenz eines Objektes gegen den Hintergrund (-himmel). Diese Methode, die nur tagsüber eingesetzt werden kann, wird in der Praxis selten angewandt.

In der Nacht kann man visuelle Extinktiometer verwenden. Der Beobachter betrachtet durch das Gerät eine bekannte Lichtquelle und verstärkt dann den eingebauten Verlaufsfilter so stark, dass das Licht gerade noch sichtbar ist. Das Gerät liefert so einen Wert für die Lichtdurchlässigkeit der Luft. Um ausreichende Genauigkeit zu erhalten, sind drei Lichtquellen mit ausreichendem Abstand notwendig.

Mit Sichtweite-LIDAR-Geräten werden schließlich aus dem Rückstreusignal eines horizontalen Laserstrahls der Extinktionskoeffizient und der Rückstreukoeffizient berechnet. Die Berechnung basiert auf verschiedenen Annahmen zum abstandsabhängigen Rückstreusignal und zur Trennbarkeit von Extinktions- und Rückstreukoeffizient. Solche Geräte eignen sich nur zur Bestimmung von geringen Sichtweiten ( $MOR < 2\ 000\ m$ ).

### 6.2.2 Messung des Streukoeffizienten (Scatterometer, Scattermeter)

Bei diesen Instrumenten wird angenommen, dass die Absorption von Strahlung gegenüber der Streuung (einschließlich der Reflexion, Refraktion und Beugung an Hydrometeoren) vernachlässigbar ist, die Extinktion also aus letzterer bestimmt werden kann. Bei Wolkentröpfchen (Nebel) ist diese Annahme meist gut erfüllt. Bei hoher Schadstoffkonzentration (Rauch) aber auch bei Staub ist die Absorption hingegen nicht vernachlässigbar.



Abb. 20-6: Sichtweitenmessgerät auf Basis der Extinktions-Transmissometer. Gezeigtes Gerät: e-MOR-2 von MTECH. Fotoquelle: Vaisala.

Es gibt drei verschiedene Arten von Scatterometern. Die erste Geräteart nützt die Vorwärtsstreuung. Dabei wird ein bestimmter Winkel zwischen Transmitter und Empfängerstrahl vorgegeben (zum Beispiel  $20^\circ$  oder  $50^\circ$ ), wie in Abb. 20-7 erkennbar ist. Die zweite Art misst die Rückstreuung. Transmitter und Empfänger sind in einem Gerät integriert. Es hat sich jedoch in mehreren Studien gezeigt, dass die Rückstreumethode im Vergleich zum Vorwärtsstreuverfahren höhere Fehler aufweist. Die dritte Möglichkeit besteht in der Streuungsmessung über einen großen Winkel (*Integrating Nephelometer*). Dabei ist der Empfänger im rechten Winkel zur Achse der Lichtquelle gerichtet und misst so Streuung über einen großen Winkel von 0 bis 120 Grad. Obwohl diese Methode theoretisch eine bessere Abschätzung des Extinktionskoeffizienten ermöglichen sollte, ist es in der Praxis schwer zu verhindern, dass das Instrument selbst den Extinktionskoeffizienten beeinflusst. *Integrating Nephelometer* werden eher für die Messung von Schadstoffen verwendet als für die meteorologische Sichtweite. Als gängigste Instrumente zur Sichtweitebestimmung anhand von Streuungsmessung zur haben sich Vorwärtsstreuemessanlagen etabliert.

Die gerätetechnischen Anforderungen für die Messung der horizontalen, aber auch der Vertikal- und der Schrägsichtweite sind in der ISO Norm 28902-1 (2012) festgelegt.

Wie bei allen Beobachtungen und Messungen ist es wichtig, Fehlerquellen zu berücksichtigen und über die Genauigkeit der quantitativen Angabe eine Aussage zu machen. Neben einer frühen vergleichenden Auswertung von MIDDLETON (1957) gab es dazu systematische Felduntersuchungen im Rahmen der *First WMO*



Abb. 20-7: Sichtweitenmessgerät auf Basis der Streuungsmessung (Scatterometer). Gezeigtes Gerät: FS11 von Vaisala. Quelle: DWD.

*Intercomparison of Visibility Measurements* (GRIGGS et al. 1990). Dabei zeigte sich, dass es systematische Unterschiede zwischen den Augenbeobachtungen und der instrumentellen Bestimmung gibt. tagsüber lag die Übereinstimmung meist in einem akzeptablen Bereich, wobei die von einem Beobachter subjektiv festgestellten Werte im Durchschnitt etwas höher (+15%) waren als die gemessenen. In der Nacht waren dagegen die Unterschiede deutlich größer. Die Augenbeobachtungen lagen im Mittel 30% über den gemessenen. Fehlerquellen bei der subjektiven Beobachtung der Sichtweite ergeben sich vor allem durch unterschiedliche physiologische Eigenschaften des menschlichen Auges. Die Beobachtungen sind durch die unterschiedliche Tag- und Nachtsichtanpassung, durch Niederschlag, physische Sichteinschränkungen oder unterschiedliche Perspektiven beeinflusst.

Eine weitere Fehlerquelle ist das sogenannte *Airlight*. Darunter versteht man Sonnenlicht, das an den Luftmolekülen und Suspensoiden zwischen Auge und Objekt in Richtung des Beobachters gestreut wird. Dieses Licht erhöht die „scheinbare Leuchtkraft“ des beobachteten Ortspunkts. Je größer der Abstand zum Objekt, desto stärker ist der Effekt und desto stärker wird der Kontrast und somit die Erkennbarkeit eines Objekts eingeschränkt.

Bei Instrumenten zur Sichtweitemessung ist ein gravierendes Problem, dass das gescannte Luftvolumen relativ klein im Vergleich zu der gesamten Umgebung ist (das Transmissometer LT31 von Vaisala weist eine Basislinie von 30 m auf, das Scatterometer PWD22 von Vaisala misst nur über eine etwa 10 cm lange Strecke). Sie führen nur dann zu brauchbaren Ergebnissen, wenn der Extinktions- oder Streukoeffizient im gesamten Gebiet einigermaßen konstant ist. Zur Detektion von unregelmäßig verteilten Dunst oder Nebelschwaden, müsste ein ganzes Messnetz an Geräten im Umkreis der Station vorhanden sein. Umso wichtiger ist es, die zeitlichen und räumlichen Variationen der gemessenen Sichtweiten mit in Betracht zu ziehen, um zumindest ansatzweise die über einen größeren Raum verteilten Sichtweiteschwankungen abschätzen zu können. So wird zum Beispiel empfohlen (GRIGGS et al. 1990), zur Bestimmung einer repräsentativen Sichtweite, die Messwerte durch eine zeitliche Mittelung über zumindest 1 bis 2 Minuten zu filtern. Ein Vorteil von Messgeräten ist jedoch zweifelsfrei die hohe relative Genauigkeit, die es zum Beispiel erkennbar macht, wenn durch die Transformation von trockenem zu feuchtem Dunst eine allmähliche Sichtwiederreduktion eintritt.

Wie bei allen Messgeräten ist die Qualität der Messungen naturgemäß von ihrer Kalibrierung, Wartung und von einer vernünftigen Wahl des Aufstellungsortes abhängig. Auch mögliche Störungen des Betriebs bei Sonnenauf- und -untergang, sowie besondere atmosphärischen Bedingungen (Regen, Schnee, Eiskristalle, Staub oder Sand, Schadstoffe, bis hin zu Insekten) sind zu berücksichtigen.

Allgemein wird die Genauigkeit der Transmissometer gegenüber den Scatterometern bei geringer Sichtweite als

höher eingestuft. Eine Gegenüberstellung von Genauigkeiten und die Charakteristik verschiedener Sichtweitemessgeräten findet sich in CROSBY (2003).

### 6.3 Visuelle Bestimmung der vertikalen Sichtweite/Ceiling

Bei räumlich konstantem Extinktions- oder Streukoeffizienten müsste unter Vernachlässigung der variablen Dichte die vertikale Sichtweite gleich der horizontalen Sichtweite sein. Die vertikale Sichtweite ist aber im Flugverkehr vor allem in Bezug auf die Untergrenze der tiefsten Bewölkung (*Ceiling*) relevant. Die tiefsten Wolken kann ein geübter Beobachter tagsüber relativ genau aus der Wolkengattung abschätzen. Besonders gut lässt sich die Wolkenuntergrenze bei konvektiven Wolken bei guter Durchmischung vom Boden weg, mit der „Henningschen Formel“ aus der Lufttemperatur T und dem der Taupunkttemperatur TD bestimmen:

$$h[m] = (T[°C] - TD[°C]) \cdot 125[m/°C] \quad (11)$$

Bei sehr niedrigem *Ceiling* sind hohe Gebäude, Türme oder Masten für die Bestimmung hilfreich. Besonders im Gebirge kann die Untergrenze von Bewölkung recht genau aus der „Schnittlinie“ mit dem Gelände bestimmt werden. Neben der möglichst genauen Angabe der Wolkenuntergrenze ist für den Flugverkehr natürlich auch der Bedeckungsgrad der tiefsten Wolken von Belang.

In der Nacht ist die subjektive Bestimmung der Wolkenuntergrenze naturgemäß viel schwieriger. Ein Wolkencheinwerfer oder ein vertikaler Laserstrahl kann für die Abschätzung sehr hilfreich sein, indem eine einfache trigonometrische Höhenabschätzung durchgeführt wird oder mit einem Winkelmesser der Winkel der als Lichtfleck wahrnehmbaren Wolkenuntergrenze im bekannten horizontalen Abstand von dem vertikalen Lichtstrahl gemessen wird.

### 6.4 Instrumentelle Bestimmung der vertikalen Sichtweite/Ceiling

Ein Ceilometer besteht aus einem LIDAR-Gerät, das Lichtpulse nach oben sendet. Ein Beispielmodell ist in Abb. 20-8 gezeigt. Aus der rückgestreuten Lichtstärke als Funktion der Zeit und der Lichtgeschwindigkeit, kann die Wolkenuntergrenze objektiv bestimmt werden. Hier gilt wie bei den Messgeräten für die horizontale Sichtweite, dass bei zeitlich variabler Wolkenuntergrenze eine Aussage über die Struktur der Wolken oder mehrere Wolkenstockwerke gemacht werden kann.

## 7 Synoptische Analyse der Sichtweite und des Ceilings

Sichtweiteanalysen, also eine flächige Darstellung der aktuellen Sichtweiten, sind nicht sehr gängig, können dem Flugmeteorologen aber einen hilfreichen Überblick über die großräumige Situation liefern.

Es existieren Systeme, die zum Teil prognostische Variablen verwenden, um eine Sichtweiteanalyse zu produzieren, welche auch Ausgangspunkt für Vorhersagen oder Nowcasting sind. GOLDING (1998) beschreibt die Verwendung von prognostizierten Temperatur-, Feuchte- und Aerosolvariablen und die Einbeziehung einer satellitenbasierten Nebelmaske für die Sichtweiteanalyse. Das von Golding beschriebene damalige Nowcastingsystem des UK MetOffice, Nimrod, bildet die Grundlage der aktuell verwendeten Tools. Die Grundzüge von Analysen aus numerischen Wettervorhersagemodellen (NWP) werden im nächsten Abschnitt beschrieben. Systeme, die auf die Einbeziehung von NWP-Output, der in den kritischen Variablen oft fehlerbehaftet ist, verzichten, sind selten. Eine Ausnahme bildet das US-amerikanische CVA (Ceiling and Visibility Analysis) Produkt des Aviation Weather Research Program der Federal Aviation Administration (HERZEGH und COWIE 2011). CVA verwendet als Eingangsdaten Wettermeldungen an den Flughäfen und wird alle fünf Minuten aktualisiert, um Änderungen der Wetterbedingungen zu erfassen. Es existiert zudem eine dreistufige Klassifizierung der Konfidenz, die vor allem auf dem Abstand zur nächsten METAR Station beruht, aber auch die Feuchte an der Station und den Unterschied in der Stationshöhe mit einbezieht.

Am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien wird derzeit in Zusammenarbeit mit dem nationalen Flugwetterdienst Austro Control GmbH an der Entwicklung eines Analysewerkzeugs für die Sichtweite und die Wolkenuntergrenze gearbeitet. Dieses soll in das bestehende Analysesystem VERA (Vienna Enhanced Resolution Analysis; STEINACKER et al. 2000) eingebettet werden. Die eingehende Sichtweiteinformation wird nicht nur aus Augenbeobachtungen (METARs, SYNOPs) bestehen, sondern auch aus instrumentellen Messungen aus dem zurzeit in Aufbau befindlichen österreichischen Netz vollautomatischer meteorologischer Stationen. Diese Stationen enthalten Sichtweitesensoren, die auf dem Vorwärtsstreuungsprinzip basieren. Ein Hauptaugenmerk bei der Entwicklung des neuen Analysesystems liegt auf der



Abb. 20-8: Ceilometer von Jenoptik, Quelle: DWD.

Einbeziehung von Zusatzdaten aus verschiedenen Quellen, wie Satelliten (hauptsächlich abgeleitete Produkte der *Satellite Application Facility on Support to Nowcasting and Very Short Range Forecasting* (NWCSAF), <http://www.nwcsaf.org>), Radiosonden, konventionelle meteorologische Bodenwettermessungen, Radar und hochaufgelöste Topographiedaten. Die gefundenen Zusammenhänge mit den mete-

orologischen und topographischen Bedingungen können in VERA anhand der „Fingerprint“-Technik (STEINACKER et al. 2006) eingebunden werden. Die Zusatzvariablen sollen jedoch auch bereits in einem Vorverarbeitungsschritt, in der Qualitätskontrolle der Eingangsdaten, Anwendung finden.

## 8 Modellvorhersagen der Sichtweite

Die automatische Vorhersage der atmosphärischen Sichtweite bleibt trotz großer Fortschritte in der numerischen Wettervorhersage ein herausforderndes Thema. Numerische Wettervorhersagemodelle modellieren die Sichtweite im Allgemeinen nicht direkt, sondern leiten sie von anderen meteorologischen Parametern, wie Flüssigwassergehalt, relative Feuchte und Niederschlag ab. Es gibt eine Reihe verschiedener Beziehungen der Sichtweite als Funktion von anderen Variablen (STOELINGA und WARNER 1999, SMIRNOVA et al. 2000, BENJAMIN et al. 2004, GULTEPE und MILBRANDT 2010). Sehr gebräuchlich war und ist die Relation von STOELINGA und WARNER (1999) (zum Beispiel im GFS verwendet), die nur den Flüssigwassergehalt einbezieht. Studien haben jedoch gezeigt, dass diese Sichtweiteberechnung mit großen Fehlern behaftet ist (GULTEPE und MILBRANDT 2010). Zum einen ist schon die Modellierung des bodennahen Flüssigwassergehalts sehr unsicher, zum anderen berücksichtigt die Relation nicht die Abhängigkeit von der Tröpfchenanzahlkonzentration.

Typischerweise werden **Model Output Statistics** (MOS) (GLAHN und LOWRY 1972) oder andere statistische Post-Processing Methoden verwendet um die deterministischen Vorhersagen zu kalibrieren und im Falle der Sichtweite oft probabilistische Vorhersagen zu erstellen. Beim MOS wird anhand von multipler linearer Regression, der NWP Output mit aktuellen Beobachtungen und geoklimatologischen Daten kombiniert. Eine spezielle Adaption des gängigen GFS-MOS für Flugwetterelemente an einzelne Flughafenstandorten, ist das *Localized Aviation MOS Program* (LAMP) des amerikanischen *National Weather Service* NWS (GHIRARDELLI und GLAHN 2010). Es aktualisiert das MOS zwischen den sechsständlichen Vorhersagezyklen und bezieht immer die neuesten Beobachtungen sowie einfache advektive Modelle mit ein. Andere statistische Postprocessing-Methoden für die Sichtweite beinhalten neuronale Netze (PASINI et al. 2001, BREMNES und MICHAELIDES 2007, MARZBAN et al. 2006) oder Bayesian Model Averaging (ROQUELAURE und BERGOT 2008, CHMIEL-ECKI und RAFTERY 2011).

Die Qualität von Sichtweitevorschagen ist stark davon abhängig, wie gut kleinräumige Prozesse der Nebelbildung im Modell repräsentiert sind; die Parametrisierung der Mikrophysik ist ausschlaggebend. Dreidimensionale Nebelmodelle sind hilfreich für ein besseres Verständnis der Prozesse, werden aber operationell aufgrund des

hohen Rechenaufwandes selten verwendet (MASBOU 2008, MÜLLER et al. 2010).

## 9 Sichtweitevorschagen im Flugverkehr

Für operationelle Sichtweitevorschagen im Flugverkehr werden Modellvorhersagen üblicherweise als Leitlinien verwendet, eine große Bedeutung haben jedoch auch die aktuellen Beobachtungen. Beim Prognostiker liegt die Herausforderung, in kritischen Situationen die zur Verfügung stehenden Informationen zu kombinieren. Sichtweitevorschagen werden zum Beispiel in TAFs (Terminal Aerodrome Forecasts) gemeldet, die für größere Flugplätze ausgestellt werden und wie METARs aufgebaut sind. Die prognostizierte Sichtweite am Boden und die Wolkenuntergrenze sind außerdem wichtige Bestandteile von General Aviation Forecasts (GAFORs). In GAFORs werden Gebiete oder Flugstreckenabschnitte anhand der beiden Variablen in eine von zumindest vier Kategorien (offen, schwierig, kritisch oder geschlossen) eingestuft. Für die Schwellwerte dieser Kategorisierung gibt es jedoch in verschiedenen Ländern leicht unterschiedliche nationale Regelungen.

## Literatur

- ALLARD, É., 1876: Mémoire sur l'intensité et la portée des phares. *Imprimerie Nationale*, Paris.
- BENJAMIN, S.G., et al., 2004: An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC. *Monthly Weather Review* **132**, 2, 495–518.
- BISYARIN, V.P. et al., 1971: Attenuation of 10.6 and 0.63 m laser radiation in atmospheric precipitation. *Radio Engineering and Electronic Physics* **16**, 1594–1597.
- BOHREN, C.F., CLOTHIAUX, E., 2006: Fundamentals of atmospheric radiation. *Wiley.com*.
- Bremnes, J.B., Michaelides, S.C., 2007: Probabilistic visibility forecasting using neural networks. *Pure and Applied Geophysics* **164**, 6, 1365–1381.
- CHMIELECKI, R.M., RAFTERY, A.E., 2011: Probabilistic visibility forecasting using Bayesian model averaging. *Monthly Weather Review* **139**, 5, 1626–1636.
- CROSBY, J.D., 2003: Visibility sensor accuracy: what's realistic. In Proc. 12th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation.
- FUJIYOSHI, Y., et al., 1983: Simultaneous observation of snowfall intensity and visibility in winter at Sapporo. *Low Temp. Sci.* **A42**, 147–156.
- GHIRARDELLI, J.E., GLAHN, B., 2010: The meteorological development laboratory's aviation weather prediction system. *Weather and Forecasting* **25**, 4, 1027–1051.
- GLAHN, H.R., LOWRY, D.A., 1972: The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. *Journal of Applied Meteorology* **11**, 8, 1203–1211.
- GOLDING, B.W., 1998: Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts. *Meteorological Applications* **5**, 1, 1–16.
- GRIGGS, D.J., et al., 1990: The first WMO intercomparison of visibility measurements. *Instruments and Observing Methods Rep.* **41**.
- GULTEPE, I., ISAAC, G.A., 2006: Visibility versus precipitation rate and relative humidity. In Proc. 12th Cloud Physics Conference, Madison, WI, American Meteorological Society.
- GULTEPE, I., MILBRANDT, J.A., 2010: Probabilistic parameterizations of visibility using observations of rain precipitation rate, relative humidity, and visibility. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **49**, 1, 36–46.
- HERZEGH, P., COWIE, J., 2011: CVA-The NCV CONUS analysis product. *CVA technical description*, Boulder, Colorado.
- ICAO, 2010: Annex 6 to the Convention on International Civil Aviation. Operation of aircraft, Part I – International Commercial Air Transport – Aeroplanes 9th ed., Montréal, Canada.
- ICAO, 2005: ICAO Annex 2 to the Convention on International Civil Aviation. Rules of the Air. 10th ed., Montréal, Canada.
- ICAO, 2006: Manual on automatic meteorological observing systems at aerodromes, Doc 9837-AN/454 1st ed., Montréal, Canada.
- ISO 28902-1, 2012: Air quality - Environmental meteorology - Part 1: Ground-based remote sensing of visual range by lidar.
- KOSCHMIEDER, H., 1924: Theorie der Horizontalen Sichtweite. Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre **12**, 33–53.
- LILLESÆTER, O., 1965: Parallel-beam attenuation of light, particularly by falling snow. *Journal of Applied Meteorology* **4**, 5, 607–613.
- MARSHALL, J.S., PALMER, W.M.K., 1948: The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology* **5**, 4, 165–166.
- MARZBAN, C., LEYTON, S., COLEMAN, B., 2006: Ceiling and visibility forecasts via neural networks. *Weather and Forecasting* **22**, 3, 466–479.
- MASBOU, M., 2008: LM-PAFOG: a new three-dimensional fog forecast model with parametrised microphysics. *Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II*.
- MELLOR, M., 1966: Light scattering and particle aggregation in snowstorms. *US Army Materiel Command, Cold Regions Research & Engineering Laboratory*.
- MIDDLETON, W.E.K., 1957: Vision through the atmosphere. In Geophysik II/Geophysics II. *Springer*, 254–287.
- MUENCH, H.S., BROWN, H.A., 1977: Measurement of visibility and radar reflectivity during snowstorms in the AFGL Mesonet. Project 8628. *Met Division, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Massachusetts*, AGFL-TR-77-0148.
- MÜLLER, M.D., MASBOU, M., BOTT, A., 2010: Three-dimensional fog forecasting in complex terrain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **136**, 653, 2189–2202.
- O'BRIEN, H.W., 1970: Visibility and light attenuation in falling snow. *Journal of Applied Meteorology* **9**, 671–683.

- PASINI, A., PELINO, V., POTESTÀ, S., 2001: A neural network model for visibility nowcasting from surface observations: Results and sensitivity to physical input variables. *Journal of Geophysical Research* **106**, 14951–14959.
- POLJAKOVA, E.A., TRETJAKOV, V.D., 1960: Visibility in falling snow. *Trudy Glavnoi Geofizicheskoi Observatorii* **100**, 53–57.
- RASMUSSEN, R.M., et al., 1999: The estimation of snowfall rate using visibility. *Journal of Applied Meteorology* **38**, 10, 1542–1563.
- REUTER, H., HANTEL, M., STEINACKER, R., 2001: Meteorologie. In W. Raith, ed. Bergmann-Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 7: Erde und Planeten. *De Gruyter*, 132–310.
- ROQUELAURE, S., BERGOT, T., 2008: A local ensemble prediction system for fog and low clouds: Construction, Bayesian model averaging calibration, and validation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **47**, 12, 3072–3088.
- SEKHON, R.S., SRIVASTAVA, R.C., 1971: Doppler radar observations of drop-size distributions in a thunderstorm. *Journal of the Atmospheric Sciences* **28**, 6, 983–994.
- SMIRNOVA, T.G., BENJAMIN, S.G., BROWN, J.M., 2000: Case study verification of RUC/MAPS fog and visibility forecasts. In Proc. 9th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 31–36.
- STALLABRASS, J.R., 1985: Measurements of the concentration of falling snow. In Proc. Snow Property Measurements Workshop (Tech. Memo. 140). Lake Louise, AB, Canada, National Research Council Canada, 389–410.
- STEINACKER, R., et al., 2006: A mesoscale data analysis and downscaling method over complex terrain. *Monthly weather review* **134**, 10, 2758–2771.
- STEINACKER, R., HÄBERLI, C., PÖTTSCHECHER, W., 2000: A transparent method for the analysis and quality evaluation of irregularly distributed and noisy observational data. *Monthly Weather Review* **128**, 7, 2303–2316.
- STOELINGA, M.T., WARNER, T.T., 1999: Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event. *Journal of Applied Meteorology* **38**, 4, 385–404.
- WARNER, C., GUNN, K.L.S., 1969: Measurement of snowfall by optical attenuation. *Journal of Applied Meteorology* **8**, 110–121.
- WEINZIERL, B., et al., 2012: On the visibility of airborne volcanic ash and mineral dust from the pilot's perspective in flight. *Physics and Chemistry of the Earth* **45**, 87–102.
- WMO, 1996: Guide to meteorological instruments and methods of observation. *WMO No. 8*, 6th edition, Geneva.

Objekt	ausgeschriebener Begriff	Erläuterung
CAT	<i>Category</i>	Betriebsstufe (I-III) des ILS, bestimmt durch die Sichtbedingungen.
GAFOR	<i>General Aviation Forecasts</i>	Flugwettervorhersage für die allgemeine Luftfahrt in Gebieten (D) oder entlang von Flugstrecken (Ö, CH) mit Einteilung in 4-5 Sichtflugstufen. <a href="http://www.notam.de/fileadmin/Files/Wetter/gaforinfo.pdf">http://www.notam.de/fileadmin/Files/Wetter/gaforinfo.pdf</a> (für D)
MOR	<i>Meteorological Optical Range</i>	Meteorologische Sichtweite, definiert durch die Reduktion des Lichtstroms einer weißglühenden Lampe mit einer Farbtemperatur von 2700K auf 5% seines ursprünglichen Wertes.
NWCSAF	<i>Satellite Application Facility on Support to Nowcasting and Very Short Range Forecasting</i>	Kooperation mehrerer nationaler Wetterdienste unter Koordination von EUMETSAT zur Nutzung von meteorologischen Satellitendaten für Nowcasting. <a href="http://www.nwcsaf.org/">http://www.nwcsaf.org/</a>
VIS	<i>Visibility</i>	Meteorologische Sichtweite, definiert als die größte Distanz, über die ein schwarzes Objekt im Tageslicht gegen den Horizont erkannt werden kann.
VIS-AERO	<i>Visibility for aeronautical purposes</i>	Sichtweite für die Luftfahrt, definiert durch den größeren Wert der beiden Merkmale a) VIS oder b) die größte Distanz, bei der Lichter mit 1000 cd gegen einen unbeleuchteten Hintergrund identifiziert werden können.
VR	<i>Visual Range</i>	Meteorologische Sichtweite, definiert durch die Distanz, bei der der Kontrast eines Objekts zu seinem Hintergrund gleich dem Schwellwert eines Beobachters ist.

B. WEINZIERL, A. DIEHL

# 21 Warnung vor Vulkanasche: Was haben wir aus den isländischen Vulkanausbrüchen 2010 und 2011 gelernt?

Warning of volcanic ash: What have we learned from the volcanic eruptions in Iceland in 2010 and 2011?

## Zusammenfassung

Vulkanasche war in der Flugmeteorologie in Mitteleuropa bis zum Ausbruch des Eyjafjallajökull 2010 (Island) kein großes Thema. Die im Frühjahr 2010 von Island nach Südosten über Mitteleuropa driftende Vulkanasche führte in Konsequenz von damals gültigen Richtlinien zu beispiellosen Einschränkungen im Luftverkehr. In der Folge entwickelte sich eine starke Dynamik zu notwendigen Maßnahmen und Regelungen zur frühzeitigen Erkennung und angemessenen Bewertung derartiger Ereignisse. Dieser Artikel präsentiert einen retrospektiven Blick auf die isländischen Vulkanausbrüche 2010 und 2011, stellt das viel diskutierte Konzept von „Visible Ash“ vor und schildert die nationalen und internationalen Fortschritte bei der Beobachtung und Vorhersage von Vulkanasche seit 2010.

## Summary

Before the eruption of Eyjafjallajökull in spring 2010, volcanic ash was not considered an issue in aviation meteorology in Central Europe. During the Eyjafjallajökull eruption, the prevailing meteorological conditions led to the fast transport of volcanic ash towards central Europe. The presence of volcanic ash in the airspace over Europe caused very extensive restrictions to aviation which were the logical consequence of international regulations valid at that time. As a consequence of the volcanic eruption in 2010, there was the need to develop new procedures and regulations for an appropriate response to future volcanic eruptions. In this article, we give a retrospective view on the volcanic eruptions in Iceland in 2010 and 2011, present the concept of “Visible Ash” and summarize the national and international progress in the monitoring and forecasting of volcanic ash since 2010.

## 1 Einleitung

Vulkanausbrüche sind nicht nur ein beeindruckendes Naturschauspiel, sondern Vulkanascheschichten in der Atmosphäre können eine erstzunehmende Gefährdung für den Luftverkehr darstellen. Vulkanasche enthält neben kristallinen Silikatbestandteilen auch glasartiges Material, das seine Materialeigenschaften unter dem Einfluss von Hitze verändert. Der Übergang von festen zu zähflüssigen Materialeigenschaften findet bei Vulkanasche schon bei Temperaturen von 700 bis 800 °C statt, die in Flugzeugtriebwerken erreicht werden (CASADEVALL 1993, DINGWELL 1996, KUEPPERS et al. 2010, LAVALLÉE et al. 2012). Der Einflug in Vulkanasche ist

dadurch wesentlich kritischer als als der Einflug in Wüstenstaubschichten, die hauptsächlich aus Quarz bestehen (Schmelztemperatur von 1650 °C). Durch Vulkanasche können Höhen- und Geschwindigkeitsmesser beschädigt, Windschutzscheiben zerkratzt, Hydraulikflüssigkeiten im Flugzeug kontaminiert oder die Kühlluftbohrungen in Triebwerken verstopft werden, was im schlimmsten Fall zum Ausfall eines oder mehrerer Triebwerke führt.

In den vergangenen 60 Jahren flogen mehr als 120 Flugzeuge unabsichtlich durch Ascheschichten von explosiven Vulkanausbrüchen wie des Pinatubo (1991, Philippinen) oder Mount Redoubt (1989/90, Alaska). Dabei traten in 79 Fällen verschiedene Grade von Flugzeug-

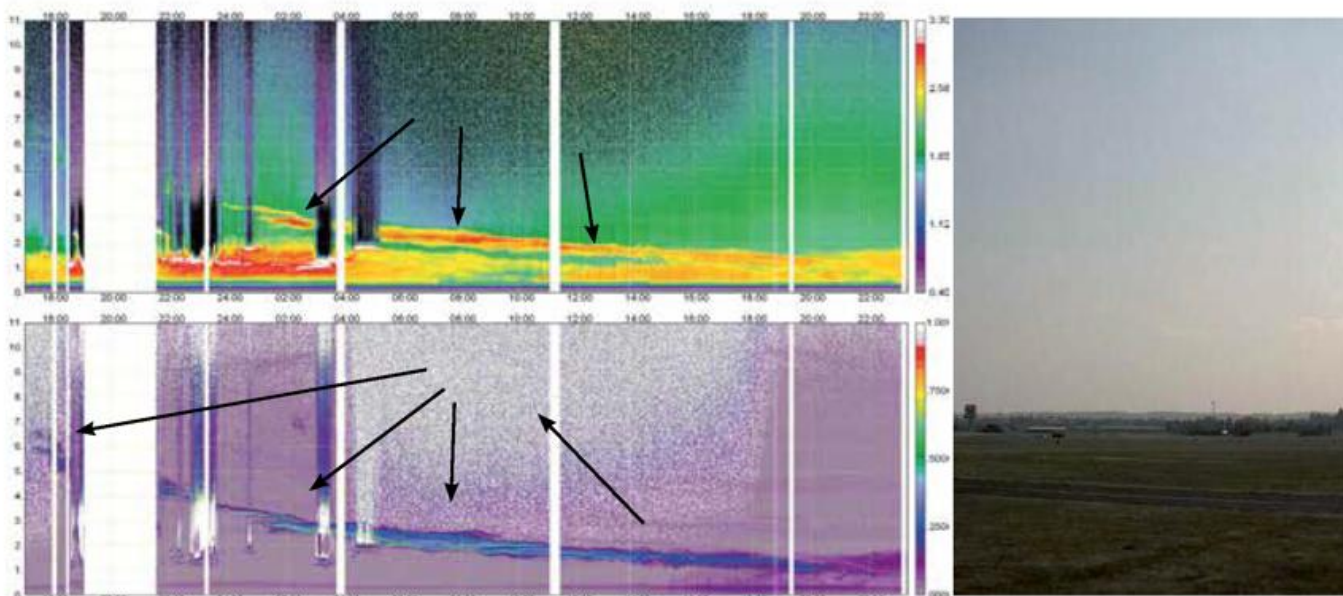


Abb. 21-1: Links: Ergebnisse aus Lidarmessungen (532 nm) des Meteorologischen Institutes der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München am 16. und 17. April 2010. Im oberen Lidarbild ist das entfernungskorrigierte Lidarsignal dargestellt, in der unteren Abbildung das lineare Volumendepolarisationsverhältnis. Rechts: Foto der Vulkanascheschicht am Lidarstandort München-Maisach am 17. April um 11:55 UTC. Aufgrund des Vorhandenseins der Vulkanasche ist der Himmel nicht mehr blau sondern gräulich. Lidarbild modifiziert aus GROSS et al. (2012), Foto: Silke Groß/Volker Freudenthaler.

und Triebwerkschäden auf und in neun Fällen fielen ein oder mehrere Triebwerke aus (GUFFANTI et al. 2010). Neben den sofort sichtbaren Triebwerksausfällen, kann es auch schleichend auftretende Schäden geben, die primär auf die ätzende Wirkung von Schwefeldioxid zurückzuführen sind. Die Gefährdung von Flugzeugen durch Vulkanasche hängt von vielen Parametern ab. Hierzu gehören außer der Massenkonzentration der Vulkanasche, der Triebwerkstyp und der Flugzustand (Start/Landung/Reiseflug), aber auch die Zeit, die ein Flugzeug in einer Ascheschicht verbringt (Aschedosis). Es ist daher schwierig, eindeutige Grenzwerte für „sicheres Fliegen in Vulkanasche“ festzulegen.

Nach den eklatanten Zwischenfällen bei Flügen durch Vulkanasche in den 1980er Jahren, wurden in den 1990er Jahren insgesamt neun *Volcanic Ash Advisory Centers* (VAAC) in Anchorage, Buenos Aires, Darwin, London, Montreal, Tokio, Toulouse, Washington und Wellington als Teil der nationalen Wetterdienste gegründet. Aufgabe der VAACs ist es, Informationen zu aktuellen Vulkanausbrüchen zu sammeln, Zugbahnen von Ascheschichten zu berechnen und vor potentiell gefährlichen Ascheschichten in der Atmosphäre zu warnen. Dabei ist das London VAAC für den Nordatlantik und das Nordmeer zuständig und das Toulouse VAAC für Afrika und Europa.

Eine weitere Reaktion auf die Vulkanaschezwischenfälle in der Luftfahrt war die Schlussfolgerung, dass maximale Flugsicherheit nur durch die Vermeidung von aschekontaminierten Lufträumen gewährleistet werden kann (CASADEVALL 1993, ICAO 2001). Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO (*International Civil Aviation Organization*) empfahl deswegen, unab-

hängig von der Aschemassenkonzentration, kontaminierte Lufträume unbedingt zu umfliegen (ICAO 2001, 2007). Im Speziellen wurde angeregt „Visible Ash“, also für das menschliche Auge sichtbare Vulkanaschegebiete, zu meiden.

Vulkanausbrüche sind insbesondere am so genannten „Ring-of-fire“ um den Pazifik keine Seltenheit. Weltweit gibt mehr als 1500 aktive Vulkane. Obwohl global etwa 50 bis 70 Vulkane pro Jahr ausbrechen (etwa ein Ausbruch pro Woche, SIEBERT et al. 2010), konnte sich vor dem Ausbruch des isländischen Vulkanes Eyjafjallajökull im Frühjahr 2010 niemand vorstellen, dass ein im Vergleich zu den Ausbrüchen des Mount St. Helens (1980) oder des Pinatubo (1991) mittelstarker Vulkanausbruch zu den weitreichendsten Luftraumsperrungen in Europa nach dem Ende des zweiten Weltkrieges führen würde. Im Zuge der „Eyjafjallajökull-Aschekrise“ war der Luftraum über Europa teilweise länger als sechs Tage geschlossen, mehr als 100.000 Flüge wurden gestrichen und mehr als 10 Millionen Passagiere waren betroffen (SCHUMANN et al. 2011). Von den Luftfahrtunternehmen und der Industrie, die mit reduzierten Transportkapazitäten und dadurch verlangsamer Produktion zu kämpfen hatten, wurden die Luftraumsperrungen zum Teil heftig kritisiert. Einer der Hauptkritikpunkte war, dass Luftraumsperrungen nur auf Modellvorhersagen basieren und keine Messungen der Vulkanaschekonzentration in der Atmosphäre durchgeführt würden.

Im den nachfolgenden Kapiteln geben wir einen Überblick über die Messungen während des Eyjafjallajökull-Vulkanausbruches und stellen das Konzept von „Visible Ash“ vor, das nach dem Ausbruch des Eyjafjallajökull als zusätzliches Sicherheitskonzept in der Luftfahrt vorge-

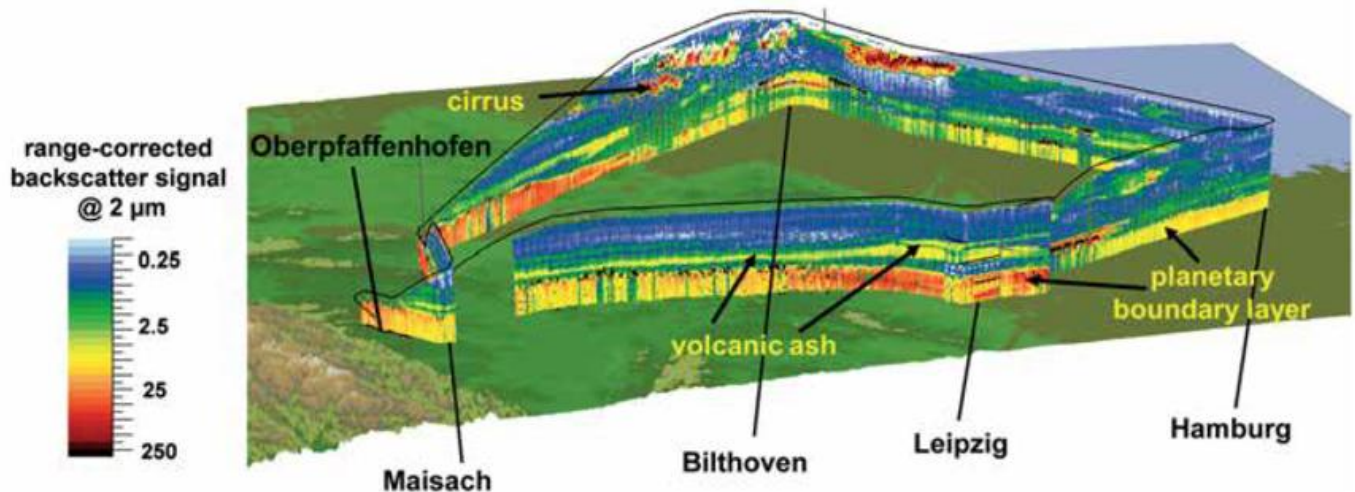


Abb. 21-2: Ergebnisse aus Lidarmessungen auf dem DLR-Forschungsflugzeug Falcon (farbcodiert) am 19. April 2010 zeigen entlang des Flugweges von Oberpfaffenhofen über Maisach, Leipzig, Hamburg, Bithoven zurück nach Oberpfaffenhofen eine 0,5 bis 2,0 km mächtige Ascheschicht in einer Höhe zwischen 4 und 6 km über Grund (gelb). Abbildung modifiziert aus SCHUMANN et al. (2011).

schlagen wurde. Nach einer kritischen Diskussion über die Schwierigkeit einen Grenzwert für sichtbare Asche zu definieren und einem retrospektiven Blick auf die isländischen Vulkanausbrüche 2010 und 2011, fassen wir die aktuelle Vorgehensweise zur Herausgabe von Vulkanaschevorhersagen und Warnungen im DWD zusammen und geben einen Ausblick auf zukünftige Herausforderungen im Umgang mit Vulkanausbrüchen.

## 2 Der Eyjafjallajökull Vulkanausbruch 2010 und die Diskussion über Vulkanaschegrenzwerte

Im Gegensatz zur öffentlichen Wahrnehmung war der Ausbruch des Eyjafjallajökull im Frühjahr 2010 nicht unerwartet: schon ab April 2009 verzeichneten Vulkanologen eine Zunahme des seismischen Tremors. Ab Februar/März 2010 wurde eine große Anzahl von Erdbeben in der Nähe des Eyjafjallajökull detektiert und eine erste Eruption ereignete sich am 20. März 2010. Der Ausbruch, der ganz Europa beeinflusste, begann am 14. April 2010. Infolge der ICAO-Empfehlung zur Vermeidung von aschekontaminierten Lufträumen wurden ab 15. April 2010 weite Teile des europäischen Luftraumes geschlossen. Abbildung 21-1 zeigt die Eyjafjallajökull-Ascheschicht

über München. Die Messungen beginnen am 16. April 2010 um 17 Uhr und enden am 17. April 2010 um 22 Uhr. Im Lidarbild sieht man die Ankunft der Ascheschicht am 16. April über München in einer Höhe zwischen 6,5 bis 7,5 km gegen 17:30 Uhr (lineare Volumendepolarisation > 0,25). Die Vulkanascheschicht ist nur 0,5 bis 1,0 km mächtig und sinkt von etwa 7 km Höhe bis in die Grenzschicht unterhalb von 2 km ab.

Messungen des DLR-Forschungsflugzeuges Falcon auf der Strecke Oberpfaffenhofen-Leipzig-Hamburg-Ca-bauw-München-Oberpfaffenhofen am 19. April 2010 (Abbildung 21-2) und Messungen von zahlreichen europäischen Lidarkollegen zeigen ebenfalls eine 0,5 bis 2,0 km mächtige Ascheschicht zwischen 4 und 6 km Höhe (siehe zum Beispiel ANSMANN et al. 2010, FLENTJE et al. 2010, GASTEIGER et al. 2011, SCHUMANN et al. 2011, GROSS et al. 2012, WEINZIERL et al. 2012b, WIEGNER et al. 2012, PAPPALARDO et al. 2013). Über Leipzig wurde die maximale Aschemassenkonzentration mit Werten von 1,0 [0,65-1,35] mg m<sup>-3</sup> am 16. April 2010 erreicht (ANSMANN et al. 2010), wohingegen das Maximum über München mit Werten von 1,1 [0,65-1,8] mg m<sup>-3</sup> am 17. April 2010 detektiert wurde (GASTEIGER et al. 2011). Flugzeugmessungen mit dem DLR-Forschungsflugzeug Falcon am 19. April 2010 zeigten über Leipzig und München Aschemassenkonzentrationen von 0,05 [0,03-0,11] mg m<sup>-3</sup> (SCHUMANN et al. 2011). Bei der Bestimmung der Aschemassenkonzentration ist es wichtig, dass Partikel im Größenbereich oberhalb von 1 µm zuverlässig detektiert werden, da diese Partikel die Aschemassenkonzentration dominieren. Auf dem Forschungsflugzeug Falcon werden Partikel bis zu Größen von 1 bis 2 µm durch sogenannte isokinetische Einlässe in das Flugzeug geleitet und dort mit verschiedenen Messinstrumenten analysiert. Partikel oberhalb von 1 µm gelangen bei typischen Falcon-Fluggeschwindigkeiten von etwa 180 ms<sup>-1</sup> nicht oder nur mit großen Verlusten ins Flugzeug und werden deswegen mit optischen Sensoren unter den Flugzeugflügeln detektiert (siehe Abbildung 21-3).



Abb. 21-3: Das DLR-Forschungsflugzeug Falcon 20-E. Unter den Flügeln befinden sich die Instrumente zur Detektion der großen (> 1 µm) Partikel.

Bezeichnung	Aschemassenkonzentration	Anmerkung	Warnungen
Zone ohne Kontaminierung	$< 0,2 \text{ mg m}^{-3}$		Keine Auswirkungen und Meldungen
Potentiell kontaminierte Zone ( <i>Low Contaminated Area</i> bzw. <i>Enhanced Procedure Zones</i> , EPZ).	$0,2\text{-}2 \text{ mg m}^{-3}$	$2 \text{ mg m}^{-3}$ wurde von einigen Triebwerksherstellern als maximal tolerierbarer Wert für den kontinuierlichen Betrieb bezeichnet (Bericht der UK CAA am 20. April 2010).	Volcanic Ash Advisories durch die VAACs <sup>1</sup> und SIGMETs VA <sup>3</sup> von den MWO Stellen.
Zone mit mäßiger Vulkanaschekonzentration ( <i>Medium Contaminated Area</i> bzw. <i>Time Limited Zones</i> , TLZ)	$2\text{-}4 \text{ mg m}^{-3}$		In Deutschland: Warnungen vor mäßigen Konzentrationen als VA-NOTAM <sup>2</sup> .
Zone mit hoher Vulkanaschekonzentration ( <i>High Contaminated Area</i> bzw. <i>Temporary Dangerous Zones</i> , TDZ)	$> 4 \text{ mg m}^{-3}$ („No Fly Zone“)	Von den Behörden in Großbritannien wurde dazu festgestellt, dass sie Informationen haben wonach Konzentrationen bis zu $4 \text{ mg m}^{-3}$ tolerabel für ein Flugzeugtriebwerk sind.	In Deutschland: Warnungen vor hohen Konzentrationen als VA-NOTAM.

Tabelle 21-1: In Deutschland gültige Vulkanaschegrenzwerte und die damit verbundenen Maßnahmen. In Deutschland sind Flüge in gemäß SIGMET und NOTAM mäßig ( $2\text{-}4 \text{ mg m}^{-3}$ ) und stark ( $> 4 \text{ mg m}^{-3}$ ) kontaminierten Lufträumen verboten. Ausnahmen und Erklärungen siehe Text.

Um den unbeschränkten Luftraum während der explosiven Phase des Eyjafjalla-Ausbruches zu maximieren, wurden Ende April 2010 vorläufige Vulkanaschegrenzwerte empirisch festgelegt (SCHUMANN et al. 2011). Im Mai 2011 nach dem Ausbruch des isländischen Vulkanes Grimsvötn wurden diese Grenzwerte vom damaligen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) verbindlich für Deutschland festgelegt (BMVBS 2011, siehe auch Tabelle 21-1). Nach diesen Vulkanaschegrenzwerten ist es erlaubt, in Gebieten mit einer Aschemassenkonzentration unterhalb von  $0,2 \text{ mg m}^{-3}$  ohne Einschränkungen zu fliegen. Beim Durchflug durch Gebiete mit Aschemassenkonzentrationen zwischen  $0,2$  und  $2 \text{ mg m}^{-3}$  müssen spezielle Wartungsverfahren angewendet werden. Sind Lufträume gemäß SIGMET<sup>1</sup> oder NOTAM<sup>2</sup> mäßig ( $2\text{-}4 \text{ mg m}^{-3}$ ) oder stark ( $> 4 \text{ mg m}^{-3}$ ) mit Vulkanasche kontaminiert, sind in Deutschland Flüge verboten.

Ausgenommen davon sind Flüge, bei denen der Luftfahrzeugführer eine Notlage erklärt hat oder bei denen eine Notlage offensichtlich ist, Flüge von Streitkräften, Such- und Rettungseinsätze, Forschungsflüge, Flüge von Luftfahrzeugen mit Kolbenmotoren oder ohne Motorantrieb. Darüber hinaus dürfen Flüge von turbinengetriebenen Luftfahrzeugen in mit Vulkanasche mäßig ( $2$  bis  $4 \text{ mg m}^{-3}$ ) kontaminierten Lufträumen nach einer Risikobewertung des Luftfahrtunternehmens, welche vom jeweiligen Triebwerkshersteller

mitgetragen wird und vom Luftfahrtbundesamt als ausreichend anerkannt wurde, durchgeführt werden (siehe auch BMVBS 2011). Abbildung 21-4 zeigt ein Beispiel für die

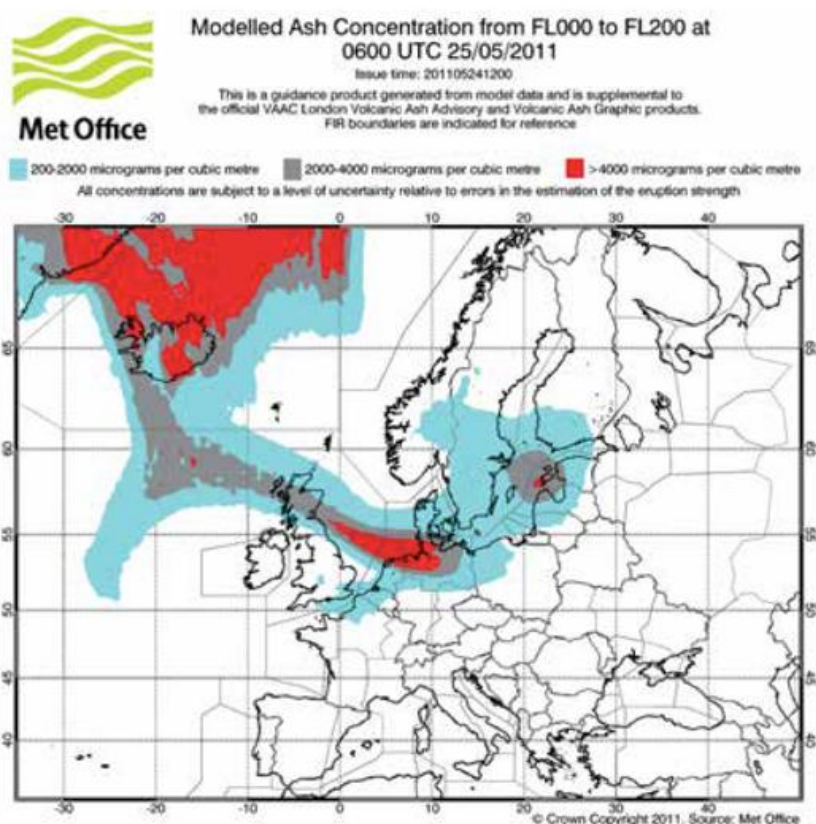


Abb. 21-4: Modellierter Ascheverteilung zwischen Flight Level (FL) FL000 und FL200 (Erdoberfläche bis etwa 6000 m) für 06 UTC am 25.05.2011 unter Berücksichtigung der neuen Grenzwerte für Vulkanasche. Zonen mit hoher Konzentration sind rot, Gebiete mit mäßiger Konzentration grau und potentiell kontaminierte Zonen sind türkis markiert. Quelle: MetOffice zum Ausgabezeitpunkt 24.5.2011, 12 UTC, im Internet.

<sup>1</sup> SIGMET (*Significant Meteorological Phenomena*) sind Warnungen für die Luftfahrt und informieren über potentiell gefährliche Wettererscheinungen, welche die Sicherheit des Luftverkehrs beeinträchtigen können. Sie werden von den Flugwetterüberwachungsstellen (MWO) für die zugeordneten Fluginformationsgebiete.

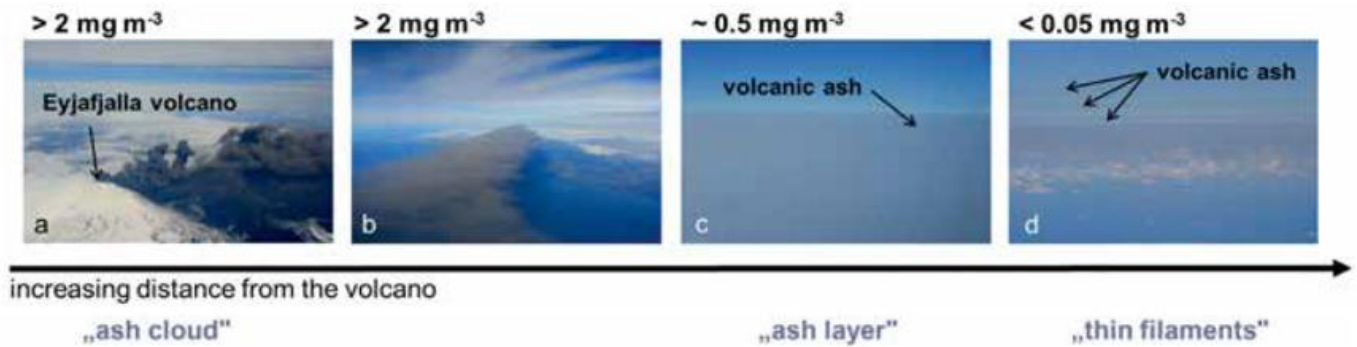


Abb. 21-5: Veränderung einer Ascheschicht mit zunehmender Entfernung vom Vulkan. Die Fotos auf der linken Seite (a, b) wurden nahe des Eyjafjallajökull-Vulkans in Island aufgenommen. Die Fotos auf der rechten Seite wurden über der Nordsee (c) beziehungsweise über Großbritannien (d) mehr als 1500 km vom Vulkan entfernt aufgenommen. Abbildung aus WEINZIERL et al. (2012a).

modellierter Ascheverteilung zwischen Flight Level (FL) FL000 und FL200 für 06 UTC am 25.05.2011 nach dem Ausbruch des Grimsvötn 2011. Zonen mit niedriger, mäßiger und hoher Vulkanaschekonzentration sind farbcodiert.

Obwohl es mittlerweile die oben genannten Grenzwerte gibt, sind die Limits für gefährliche Aschemassenkonzentrationen nach wie vor höchst unsicher, da wie in Abschnitt 1 beschrieben die Gefährdung eines Flugzeuges durch Vulkanasche von vielen Parametern abhängt. Darüber hinaus können die Ascheeigenschaften von Vulkan zu Vulkan sowie von Eruption zu Eruption variieren womit die Gefährdung verschieden sein kann. WITHAM et al. (2012) haben mit Modellsimulationen gezeigt, dass bei den Vulkanascheeinflügen, in denen Triebwerksausfälle auftraten, Aschemassenkonzentration von mindestens  $4 \text{ mg m}^{-3}$  vorlagen und zum Teil sogar deutlich höhere Werte auftraten. Der Einfluss von Vulkanasche auf Flugzeugtriebwerke soll im Frühjahr 2015 in Bodentests genauer untersucht werden. Bei diesen Tests wird ein Forschungsteam bestehend aus U.S.-Regierungsorganisationen und Triebwerksherstellern ein F117-Triebwerk der NASA über mehrere Stunden Vulkanaschemassenkonzentrationen zwischen 1 und  $10 \text{ mg m}^{-3}$  aussetzen und untersuchen, ab wann Schäden am Triebwerk auftreten. Für die Tests wird natürliche Vulkanasche verwendet, die charakteristisch für Asche in einigen 100 bis 1000 km Abstand zum Vulkan ist (LEKKI et al. 2013).

### 3 Sichtbarkeit von Vulkanasche und die Frage, warum es so schwer ist einen Grenzwert für „Visible Ash“ zu definieren

Eine zusätzliche Forderung neben der Einführung von Vulkanaschegrenzwerten war die Vermeidung von „Visible Ash“, also Ascheregionen, die für das menschliche Auge sichtbar sind. Im nachfolgenden Abschnitt gehen wir der Frage nach, ab welcher Massenkonzentration Vulkanasche in einem Flugzeugcockpit sichtbar ist, ob ein Pilot aus dem Flugzeugcockpit potentiell „gefährliche“ ( $> 2 \text{ mg m}^{-3}$ ) von „ungefährlicher“ Asche unterscheiden kann und ob man Ascheschichten von anderen in der Atmosphäre vorhandenen Aerosolschichten wie Waldbrandaerosol oder Wüstenstaub unterscheiden kann.

Abbildung 21-1 (rechts) zeigt ein Foto, das während des Vulkanaschemaximums bei geschlossenem Luftraum am 17. April 2010 über München aufgenommen wurde. Auf den ersten Blick ist keine „Aschewolke“ sichtbar. Jedoch ist der Himmel an diesem Tag nicht blau, sondern infolge der Streuung des einfallenden Sonnenlichtes an großen Vulkanaschepartikeln gräulich. Bei der Betrachtung von Abbildung 21-1 (rechts) stellt sich die Frage, ob die Bezeichnung „Aschewolke“ für eine weit von der Quelle entfernte Ascheschicht angemessen ist. Abbildung 21-5 illustriert die Veränderung einer Vulkanascheschicht während des Transportes vom Vulkan in entferntere Gegenden: Es ist offensichtlich, dass die Bezeichnung „Aschewolke“, also die Existenz einer braunen Wolke, nur in der Nähe des Vulkanes zutrifft, wohingegen in größerer Entfernung zum Vulkan eher eine gräulich-bräunliche Schicht, ähnlich der verschmutzten Grenzschicht sichtbar ist. Die Fotos in Abb. 21-5 zeigen nicht nur Ascheschichten, sondern es sind auch die zugehörige mit dem Forschungsflugzeug Falcon in-situ vermessene Aschemassenkonzentration angegeben (Abbildung 21-5 c und d).

Vulkanascheregionen können vom Cockpit eines Flugzeuges aus sichtbar sein, weil sie eine unübliche Farbe haben („braune Aschewolke“) oder weil sie den Kontrast reduzieren (Abbildung 21-5 c und d). Zweiteres ist davon abhängig, wie viel Kontrast vorhanden ist. Nachts und in Gegenwart von Wolken (Abbildung 21-6) ist Vulkanasche nicht (oder nur schlecht) sichtbar. Um der Frage nach der minimal sichtbaren Aschemassenkonzentration nachzugehen haben WEINZIERL et al. (2012 b) die Sichtbarkeit von Ascheschichten aus dem Cockpit eines Flugzeuges mit dem Strahlungstransportmodell „libRadtran“ (MAYER und KYLLING 2005) für eine 500 m dicke Ascheschicht simuliert. Die Sichtbarkeit von Vulkanasche hängt dabei nicht nur vom Hintergrundkontrast und den Beleuchtungsbedingungen (Sonnenstand) ab, sondern auch von der geometrischen Dicke der Ascheschicht, der Größenverteilung der Aschepartikel oder der Position des Beobachters relativ zur Ascheschicht. Die von WEINZIERL et al. (2012b) durchgeführten Simulationen sind deshalb nur ein Hinweis darauf, ab welchen Aschemassenkonzentrationen man Vulkanasche unter idealisierten Bedingungen ohne Wolken untertags sehen würde.

<sup>2</sup> NOTAMS (Notice to Airmen) sind Anordnungen und Informationen über temporäre oder auch permanente Änderungen der Aeronautical Information Publication (AIP), die für einen geordneten, sicheren und flüssigen Flugverkehr wichtig sind.



Abb. 21-6: Links: Vulkanasche mit Massenkonzentration  $> 1 \text{ mg m}^{-3}$  und Wolken beobachtet vom DLR-Forschungsflugzeug Falcon am 1. Mai 2010 nahe Island. Rechts: Aschewolke des Eyjafjallajökulls beim Überflug über den Vulkan am 29. April 2010.

Die Ergebnisse der idealisierten Simulationen zeigen, dass Ascheschichten unter optimalen Bedingungen (niedrige Hintergrundaerosolkonzentration, keine Wolken) schon ab Konzentrationen deutlich unter dem in Deutschland gültigen „Grenzwert für sicheres Fliegen“ ( $2 \text{ mg m}^{-3}$ ) für das menschliche Auge sichtbar sein können. Der Parameter der die Sichtbarkeit maßgeblich mitbestimmt ist dabei die geometrische Dicke der Ascheschicht und die optische Dicke entlang der Sichtlinie des Beobachters. Abbildung 21-7 zeigt den Einfluss der vertikalen Mächtigkeit der Ascheschicht auf die Sichtbarkeit: von links nach rechts nimmt die geometrische Dicke der Ascheschicht von 500 m auf 2 km zu. Gleichzeitig nimmt die Aschemassekonzentration in der simulierten Schicht von  $2 \text{ mg m}^{-3}$  auf  $0,5 \text{ mg m}^{-3}$  ab. In allen drei Fällen erscheint die Ascheschicht für das menschliche Auge gleich, obwohl im Fall der 2 km dicken Ascheschicht (Abbildung 21-6, rechts) die Massenkonzentration um einen Faktor 4 niedriger ist als im Fall der 0,5 km mächtigen Ascheschicht (Abbildung 21-7, links). Aus Abb. 21-7 ist erkennbar, dass die geometrische Dicke einer Ascheschicht die Sichtbarkeit von Ascheregionen stark beeinflusst. Im Gegensatz dazu hängt der Einfluss von Vulkanasche auf Flugzeugtriebwerke von der Aschemassenkonzentration beziehungsweise der Aschedosis ab und nicht von der vertikalen Mächtigkeit der Ascheschicht. Vulkanasche kann zwar als graue Schicht erkennbar sein, jedoch weist das Vorhandensein einer grauen Schicht nicht zwingend auf die Präsenz von Vulkanasche in der Atmosphäre hin. So ist auch Saharastaub, Waldbrandaerosol oder die verschmutzte Grenzschicht als graue Schicht in der Atmosphäre erkennbar (siehe Abbildung 21-8).

Die Simulationen von WEINZIERL et al. (2012a) und SAUER et al. (2013) sowie die Fotos in den Abbildungen 21-5, 21-6 und 21-8 zeigen, dass es weder einen eindeutigen Grenzwert für die Sichtbarkeit von Vulkanasche für das menschliche Auge gibt, noch können Vulkanascheschichten visuell von anderen Aerosolschichten wie zum Beispiel Saharastaub oder Waldbrandaerosol unterschieden werden. „Visible Ash“ kann damit kein gutes Sicherheitskriterium sein. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Arbeiten sind mittlerweile in ein Working Paper der ICAO „International Airways Volcano Watch Operations Group“ eingegangen, in dem „Visible Ash“ definiert wird:

“Visible Ash be defined as “volcanic ash observed by the human eye” and not be defined quantitatively by the observer; (...) In particular, “visible” should absolutely not be considered as a proxy for the widely referenced concentration value of  $2 \text{ mg m}^{-3}$ .”

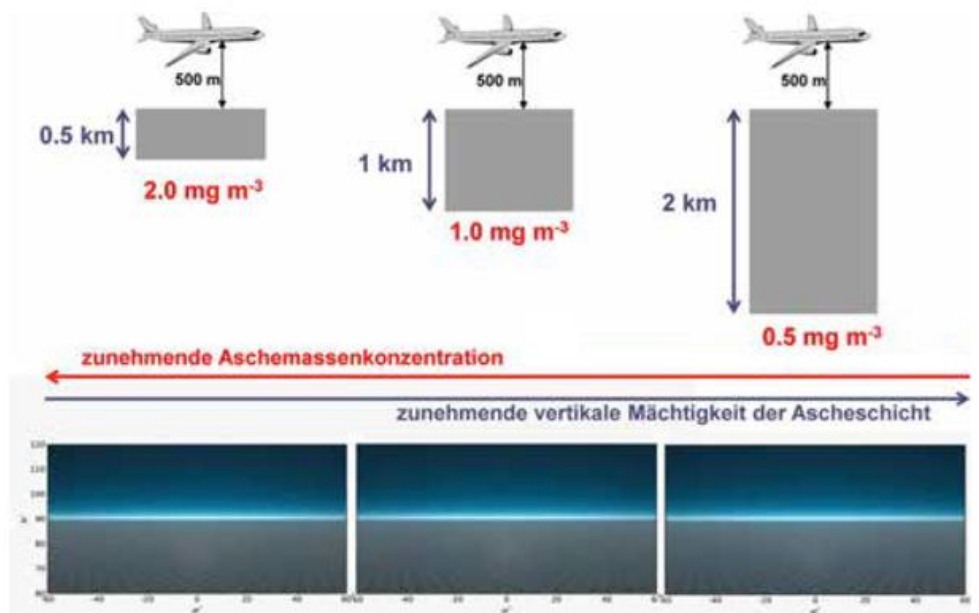


Abb. 21-7: Einfluss der geometrischen Dicke der Ascheschicht auf die Sichtbarkeit: Von links nach rechts nimmt die geometrische Dicke der Ascheschicht zu und die Massenkonzentration in der Ascheschicht ab. In allen drei Fällen erscheint die Ascheschicht für das menschliche Auge gleich (Simulationsergebnisse: Daniel Sauer, LMU/DLR).

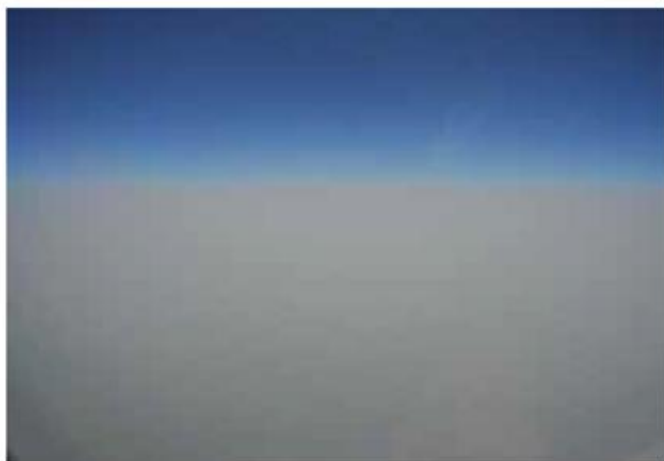


Abb. 21-8: Links: Blick vom Forschungsflugzeug Falcon auf eine 5 km mächtige Saharastaubschicht in der Kapverden-Region am 11. Juni 2013. Die Saharastaubschicht reduziert den Kontrast so stark, dass der Boden nicht mehr erkennbar ist. Rechts: 2 km mächtige Waldbrandaerosolschicht fotografiert am 11. Juni 2012 in der Nähe von Salina, Kansas (USA).

Für den operationellen Einsatz und zur Erstellung von Vulkanaschewarnungen durch die Vulkanaschewarnzentren (VAAC) wird deswegen in Zukunft „Discernible Ash“, die durch vereinbarte In-Situ- und/oder Fernerkundungsverfahren bestimmte Aschekonzentration, als Kriterium benutzt.

#### 4 Retrospektiver Blick auf den Ausbruch des Eyjafjallajökull 2010

Der Ausbruch des Eyjafjallajökull im Frühjahr 2010 hatte einen großen Einfluss auf den Luftverkehr in Europa. Die Stärke dieses Ausbruches war jedoch auf der Intensitätsskala von Vulkanausbrüchen nur ein „mittlerer“ Ausbruch mit einer Rekurrenzzzeit von 30 bis 50 Jahren. Im Unterschied zu vielen anderen, zum Teil nur wenige Stunden andauernden Vulkanausbrüchen, hatte der Eyjafjalla-Ausbruch über einen Zeitraum von 39 Tagen zwei explosive Phasen, die durch eine Phase von Lavabildung und reduzierter Aktivität getrennt waren (PETERSEN et al. 2012). Durch die vorherrschenden meteorologischen Bedingungen wurde die Vulkanasche schnell südwärts nach Zentraleuropa transportiert (zum Beispiel STOHL et al. 2011). Die Windverhältnisse auf 500 hPa zeigten dabei im Frühjahr 2010 mit einer deutlich erhöhten nördlichen Windkomponente eine klare Abweichung vom klimatologischen Mittelwert (PETERSEN et al. 2012). Mittlere Windrichtungen in bestimmten Höhen sind zwar ein Maß für den Vulkanaschetransport, sie berücksichtigen aber weder die Emissionshöhe, noch die Menge der emittierten Asche oder komplexe meteorologische Situationen. WEINZIERL et al. (2012a) haben deswegen mit dem Lagrangeschen Transportmodell FLEXPART (STOHL et al. 2005) den potentiellen Aschetransport auf statistischer Basis untersucht. Um abzuschätzen, ob der Transport der Eyjafjallajökull-Vulkanasche nach Zentraleuropa einer meteorologischen Ausnahmesituation im Frühjahr 2010 geschuldet war oder ob es sich hier um ein typisches Transportmuster handelt, wurde mit FLEXPART berechnet, wie oft bei einem Ausbruch des Eyjafjallajökull an einem beliebigen Tag im Zeitraum zwischen 1999 und

2010 eine Massenkonzentration von  $2 \text{ mg m}^{-3}$  an einem beliebigen Punkt in Deutschland überschritten worden wäre. Die Ergebnisse der idealisierten Simulationen zeigen eine durchschnittliche Überschreitung des Grenzwertes von  $2 \text{ mg m}^{-3}$  von 32 Stunden mit einem Maximum von 81 Stunden für einen Ausbruch am 18. September 2001 und einem Minimum von 3,8 Stunden für einen Ausbruch am 2. Januar 2001. Damit war der Transport von Eyjafjalla-Vulkanasche nach Zentraleuropa kein außergewöhnliches Ereignis, wenn man die ungewöhnlich lange Dauer der Eruption berücksichtigt. Auch auf geologischen Zeitskalen ist der Transport von isländischer Vulkanasche nach Nord- und Zentraleuropa nicht ungewöhnlich: SWINDLES et al. (2011) zeigen auf der Basis von Sedimentanalysen für die vergangenen 7000 Jahre, dass die Wahrscheinlichkeit eines Tephra-Fallouts über Nordeuropa in einer Dekade bei 16 % liegt. Es ist deswegen notwendig, für den Fall eines erneuten Vulkanausbruches in Island mit nachfolgendem Aschetransport nach Deutschland vorbereitet zu sein.

#### 5 Vorgehensweise zur Herausgabe von Vulkanascheworhersagen und -warnungen im Deutschen Wetterdienst (Stand: 20.06.2013)

Aufgrund der Erfahrungen mit den Vulkanausbrüchen 2010 und 2011 auf Island war die Entwicklung eines Betriebskonzeptes notwendig, das die Aktivitäten des DWD und die Zusammenarbeit mit der Deutschen Flugsicherung (DFS) und Krisenstäben des Bundes und der Länder regelt. Im folgenden Kapitel beschreiben wir die Vorgehensweise des DWD bei einem Vulkanausbruch mit nachfolgender Verlagerung einer Vulkanaschewolke nach Mitteleuropa in den deutschen Luftraum. Die größte Herausforderung nach einem Vulkanausbruch ist dabei die räumliche und zeitliche Vorhersage von Vulkanaschemassenkonzentrationen und deren Verbreitung an operationelle Entscheidungsträger bei der DFS.

Zur Vermeidung der Gefahren von Vulkanausbrüchen für die Luftfahrt werden von der ICAO seit geraumer Zeit Handbücher und Notfallpläne herausgegeben. So beschreibt

als Beispiel das "ICAO – Handbook on the *International Airways Volcano Watch (IAVW)-Operational Procedures and Contact List*" die notwendigen Abläufe im Falle eines Vulkanausbruchs zur Unterrichtung der Luftfahrt. Nach den Erfahrungen mit den isländischen Vulkanausbrüchen 2010 und 2011 wurden die ICAO-Regelungen überarbeitet, Zuständigkeiten wurden neu geregelt, die Formate für Vulkanaschehinweise (*Volcanic Ash Advisories*), SIGMETs VA<sup>3</sup>, NOTAMs und ASHTAM's wurden verbessert und es wurden regelmäßige Übungen eingeführt.

Grundlagen zur Verbreitung von Warnungen vor Vulkanasche sind neben ICAO Annex 3 (*Meteorological Service for International Air Navigation*) der ICAO EUR Doc 019 (*ICAO European Volcanic Ash Contingency Plan*). Laut ICAO Annex 3 sind die *Meteorological Watch Offices* (MWO) für die Herausgabe von SIGMETs zuständig, die auf signifikante Wettererscheinungen für die Luftfahrt hinweisen. MWOs in Deutschland sind die DWD-Luftfahrtberatungszentralen an den Flughäfen Frankfurt/Main, Hamburg und München.

In der Vergangenheit war der DWD ausschließlich von den Vorhersagen und Hinweisen des VAAC in London abhängig. Ein dem Warnprozess konformes Vorgehen war nicht möglich, da eigene Modellvorhersagen nicht zur Verfügung standen, sowie ein Beobachtungsnetz und besondere Beobachtungsmethoden weitgehend fehlten oder nicht operationell nutzbar waren. Das Betriebskonzept Vulkanaschevorhersage im DWD beschreibt, übertragen auf die besonderen Anforderungen zur Überwachung, Beobachtung und Vorhersage von Vulkanasche, die im flugmeteorologischen Warnprozess des DWD übliche Vorgehensweise, ein Nowcasting mit Beobachtungen und Messungen aus der Fernerkundung sowie bodengestützter Daten und eine Vorhersage auf Basis geeigneter Vorhersagemodelle durchzuführen.

Im Falle eines Vulkanausbruchs werden VA-Teams bestehend aus zwei Flugwetterberatern gebildet, die nach einem 24-stündigen Einsatzplan organisiert sind und denen die folgenden Tätigkeiten obliegen:

- Bewertung der kurzfristigen VA-Vorhersagen vom VAAC London, VAAC Toulouse, sowie weiterer Vorhersagemodelle wie COSMO\_ART (DWD) oder FLEXPART vom *Norwegian Institute for Air Research* (NILU). Abbildung 21-9 zeigt ein Beispiel für Vulkanaschevorhersagen mit COSMO\_ART,
- Bewertung mittelfristiger Szenarien mittels aller verfügbaren Vorhersagemodelle zur Windströmung und Ausbreitung der Vulkanasche,
- Auswertung aller verfügbaren Beobachtungen und Messungen (Satellitendaten, Online-Ceilometer, LIDAR, flugzeuggestützte Messungen). Abbildung 21-10 gibt einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Ceilometermessungen,
- Erstellung von Vorwarnungen,

- Erstellung von NOTAM-Vorlagen zur internationalen Verbreitung (Vorhersage für 6 Stunden, Aktualisierung alle 6 Stunden, gegebenenfalls zwischenzeitlich Amendierungen bei Vorliegen neuer Erkenntnisse),
- Erstellung stündlich aufgelöster Vorhersagen für den Luftraum der Bundesrepublik Deutschland für mäßige und hohe Konzentrationen (Vorhersage für 12 Stunden, Aktualisierung alle 6 Stunden, gegebenenfalls zwischenzeitlich Amendierungen bei Vorliegen neuer Erkenntnisse),
- Direkte Beratung der Entscheidungsträger von DFS und BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur),
- Information der Luftfahrtberatungszentralen (LBZ) mittels regelmäßiger und situativer Telefonkonferenzen,
- Erstellung eines Statusberichtes alle 6 Stunden für den DWD (Vorstand, Abteilung Flugmeteorologie, Stabstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit, Online-Redaktion) sowie die DFS und Krisenstäbe.

### 5.1 Phasen des Vulkanausbruchs und damit verbundenes Vorgehen

Bei einem Vulkanausbruch unterscheidet man drei Phasen (Alarmphase, reaktive Phase und aktive Phase), die ein unterschiedliches Vorgehen verlangen. Tabelle 21-2 gibt einen Überblick über die Aktivitäten in Deutschland in den unterschiedlichen Phasen eines Vulkanausbruchs in Europa und angrenzenden Gebieten. Die aus den ICAO Dokumenten entnommenen Betriebsphasen werden in Deutschland mit besonderen Maßnahmen konkretisiert, die speziell zwischen DWD und DFS in *Service Level Agreements* festgelegt wurden, um bestmögliche operative Ergebnisse zu erzielen.

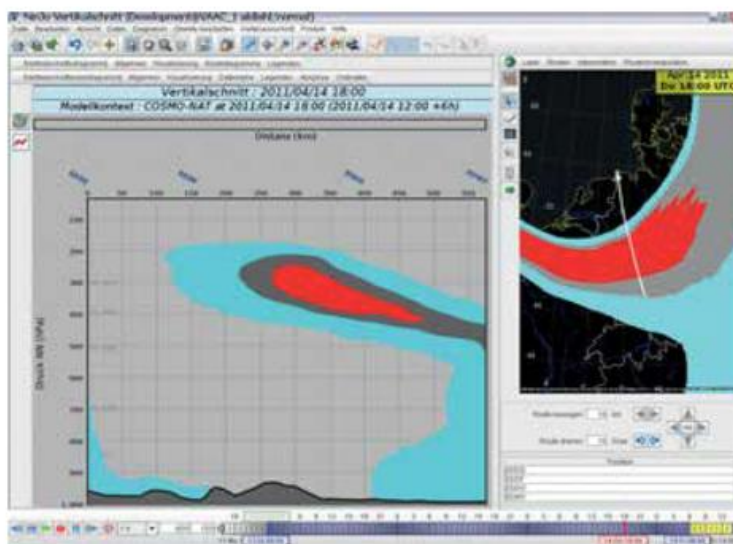


Abb. 21-9: Vulkanaschevorhersagen mit COSMO\_ART im meteorologischen Vorhersagesystem NinJo. Die Simulationen entstanden bei einer Vulkanascheübung und zeigen eine Vulkanascheschicht, die am 14.04.2011 um 18 UTC über West- und Zentraleuropa liegt (rechts). Auf der linken Seite ist ein Vertikalschnitt entlang des weißen Pfeils in der rechten Abbildung dargestellt. Farbcodiert sind niedrige ( $0,2-2 \text{ mg m}^{-3}$ , türkis), mäßige ( $2-4 \text{ mg m}^{-3}$ , grau) und hohe ( $> 4 \text{ mg m}^{-3}$ , rot) Aschemassenkonzentrationen (Quelle: NinJo/COSMO\_ART DWD intern).

<sup>3</sup> VA (*Volcanic Ash*): Vulkanasche

<sup>4</sup> Ein ASHTAM (*ash report to airman*) ist eine Spezialform des NOTAMs, das vor vulkanischen Aktivitäten, Vulkanausbrüchen und vulkanischen Aschewolken warnt, sofern sie für die Luftfahrt von Bedeutung sind.

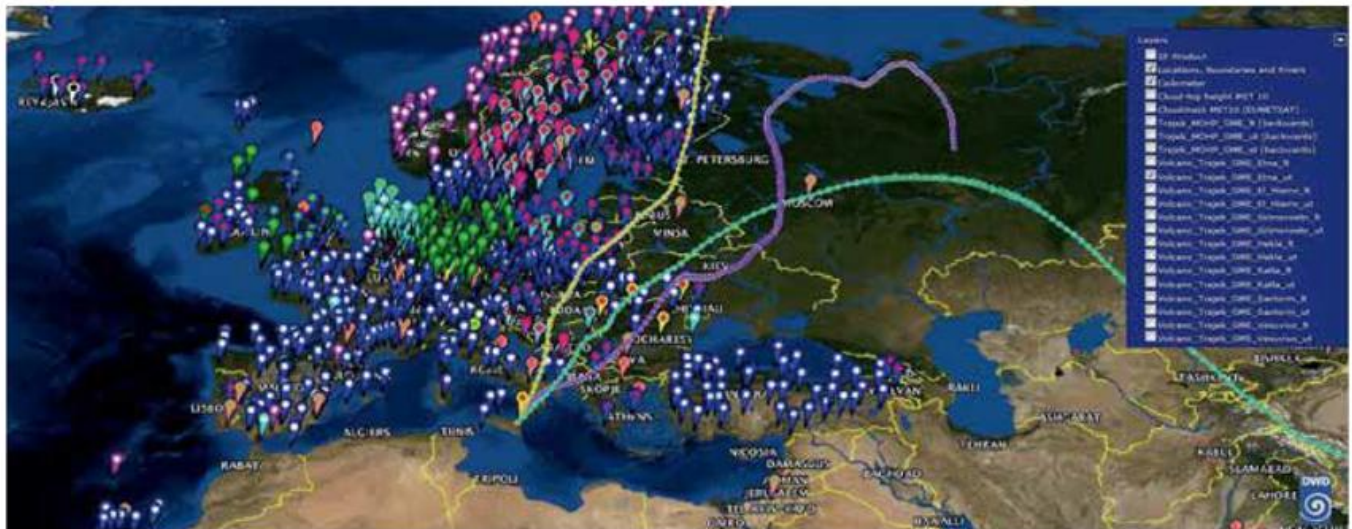


Abb. 21-10: Landkarte mit verfügbaren Ceilometermessungen zusammen mit möglichen Trajektorien für Luftmassen, die von einem Vulkanausbruch des Ätna in unterschiedlichen Höhen ausgehen würden (Quelle: <http://www.dwd.de/ceilomap>).

Die Alarmphase bezeichnet eine Situation, in der ein Vulkanausbruch erwartet wird. Wird einer MWO-Stelle bekannt, dass ein Vulkanausbruch zu erwarten ist, werden die Informationen über das Ausmaß der Vulkanaktivitäten unmittelbar an die zugehörigen ACC (*Area Control Center – Flugsicherung*) und das zuständige VAAC weitergegeben. Dadurch entwickelt sich ein internationaler Datenaustausch. Die Abteilung Flugmeteorologie hat diverse Maßnahmen ergriffen (zum Beispiel durch die Zumeldung von E-Mail-Verteilern und Notfalllisten), um rechtzeitig von Vulkanaktivitäten vor der Herausgabe von *Volcanic Ash Advisories* (VAAs) informiert zu werden (siehe Tabelle 21-2).

Die reaktive Phase beschreibt eine Situation, bei der ein Vulkanausbruch erfolgt ist und sich Vulkanasche im Luftraum über dem ausgebrochenen Vulkan befindet, oder bereits benachbarte Gebiete erreicht hat. Es ist dabei auf Basis der vorliegenden Informationen noch nicht zu erwarten, dass der deutsche Luftraum in den nächsten 12 Stunden betroffen sein wird. Infolge des Vulkanausbruches informiert das für diesen Luftraum zuständige MWO unverzüglich das verantwortliche VAAC durch die Ausgabe einer SIGMET Information über den Vulkanausbruch oder die beobachtete Vulkanaschewolke im betroffenen Luftraum.

Außerdem werden alle relevanten Informationen über das Ausmaß und die Konzentration von vulkanischer Asche an die angrenzenden MWOs weitergegeben. Wird einem MWO das Auftreten von vulkanischer Asche aus einer anderen Quelle als dem VAAC bekannt, werden diese Informationen umgehend dem VAAC und den benachbarten MWOs bekannt gemacht, in die sich die Aschewolke verlagern könnte.

Nach Bekanntwerden des Vulkanausbruches wird ein besonderes Vulkanaschewolken-„Monitoring“ mittels Satellitendaten, Fernerkundung, Observatorien und numerischer Wettervorhersage initiiert. Im Einzelfall werden

auch *Special Air Reports* über Vulkanaktivitäten (zum Beispiel Rauchfahnen) vor dem eigentlichen Ausbruch an das zuständige VAAC übertragen. Die vom VAAC herausgegebenen VAAs enthalten Hinweise auf potentiell mit Vulkanasche kontaminierte Gebiete (in Form von Koordinaten) und Höhenintervalle (in Flugflächen). Damit geben die VAAs zwar die maximale räumliche Ausdehnung der Aschewolke wieder, enthalten aber keine Konzentrationsangaben. Gemäß internationalen Vorschriften sollen diese „Hinweise“ von den MWO-Stellen weiterverarbeitet werden. Darüber hinaus werden Daten und Karten für unterschiedliche Aschekonzentrationen herausgegeben, um zwischen niedrig kontaminierten und hoch kontaminierten Gebieten besser differenzieren zu können. Wenn Unterschiede zwischen Beobachtungen von Flugzeugen und Informationen in veröffentlichten VAAs, SIGMETs oder NOTAMs festzustellen sind, wird vom VAAC unverzüglich ein korrigierter Bericht, vorzugsweise in Form eines ARS (*Air Report Special*) und/oder eines korrigierten VAA für die jeweiligen MWOs erstellt. Das zuständige MWO erstellt danach auf Basis des korrigierten Advisories ein neues SIGMET.

Nach der Kenntnisnahme über die Existenz einer „Vulkanaschewolke“ in der näheren Umgebung und einer möglichen Verlagerung in den deutschen Luftraum in einem Zeitraum von mehr als 12 Stunden werden im DWD die in Tabelle 21-2 aufgeführten Aktivitäten eingeleitet. Solange zu erwarten ist, dass der deutsche Luftraum in den nächsten 12 Stunden noch nicht von der Vulkanaschewolke betroffen ist, müssen nach Erhalt eines VAAs, eines Special Air Report oder Informationen aus anderen Quellen über Vulkanasche alle verfügbaren Daten ständig miteinander verglichen und auf Konsistenz geprüft werden.

In der aktiven Phase wird erwartet, dass die Vulkanaschewolke in den nächsten 12 Stunden im deutschen Luftraum ankommt. Tabelle 21-2 fasst die von der „Task Force Vulkanaschevorhersage“ in dieser Phase durchgeführten Aktivitäten zusammen.

Phase	Handlungsschritte
Alarmphase (Vorbereitung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktivierung von Notfallplänen und Versand von Verteilerlisten an BMVI, BAF (Bundesaufsichtsamtsamt für Flugsicherung), DFS und DLR,</li> <li>• Einstellung erster Informationen über mögliche Vulkanaktivitäten über die Emergency Website (geschlossene Benutzergruppe im <i>Meteorological Airport Briefing</i> des DWD),</li> <li>• Überprüfung der DWD-Produkte mit potentiellen Informationen über Vulkanasche auf Aktualität (<i>Low Level Significant Weather Chart</i> - LLSWC, METAR, GAMET, SIGMET, graphische Darstellungen von Modellvorhersagen und VAA),</li> <li>• Information der Nutzer der Emergency Website über mögliche Vulkanaktivitäten,</li> <li>• Information der MWOs des DWD durch die Abteilung Flugmeteorologie über mögliche Aktivitäten,</li> <li>• Information der Geschäftsbereiche des DWD und Einleitung von Aktivitäten, um Online-Ceilometer- und Flugzeugmessungen verfügbar zu haben und die Modellkette für Ausbreitungsberechnungen zu starten,</li> <li>• Information von DFS und BMVI über einen möglichen Vulkanausbruch.</li> </ul>
Reaktive Phase (Überwachung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktivierung der „Task Force Vulkanaschevorhersage“ im „Rund-um-die-Uhr-Betrieb“ zur Steuerung und Überwachung aller nachfolgenden Aktivitäten,</li> <li>• Prüfung von Formularen und Unterlagen für die Herausgabe von SIGMETs (VA) und Flughafenwetterwarnungen,</li> <li>• Überwachung aller verfügbaren Datenquellen und Prüfung von Formularen und Unterlagen zur Herausgabe von NOTAMs,</li> <li>• Verbreitung aller VAA-Hinweise und eigener Einschätzungen über die weitere Entwicklung über die <i>Emergency Website</i>,</li> <li>• Durchführung von weiteren über das Maß der Alarmphase hinausgehende Aktivitäten.</li> </ul>
Aktive Phase (Warnung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herausgabe von SIGMETs (VA), ggf. Herausgabe von Flughafenwetterwarnungen, Prüfungen zur Herausgabe von NOTAMs,</li> <li>• Überwachung aller verfügbaren Datenquellen, Vergleich von Modelldaten und Beobachtungsdaten,</li> <li>• Bereitstellung aller VAA-Hinweise und eigener Einschätzungen über die weitere Entwicklung auf der <i>Emergency Website</i>,</li> <li>• Überprüfung aller Produkte des DWD, welche potentiell Informationen über Vulkanasche enthalten können (SIGMET, NOTAM, ASHTAM, SWC, METAR; GAMET, graphische Darstellungen von Modellvorhersagen und VAA) auf kontinuierliche Aktualisierung auf der Emergency Website,</li> <li>• Kontinuierliche Erinnerung und Information der Nutzer der Emergency Website über die Existenz der Vulkanaschewolke und die Verlagerung in den deutschen Luftraum,</li> <li>• Information der eigenen Luftfahrtberatungszentralen über Aktivitäten, die über die Informationen aus <i>Advisories</i> und <i>Special Air Reports</i> hinausgehen und Abstimmung des weiteren Vorgehens unter anderem in regelmäßigen Telefonkonferenzen,</li> <li>• Information der Geschäftsbereiche des DWD über laufenden Aktivitäten und Abstimmung über das weitere Vorgehen,</li> <li>• Beratung der eingesetzten Flugzeugbesatzung und Empfehlungen für durchzuführende Messflüge; Übermittlung der Messergebnisse an den operationellen Flugwetterdienst.</li> </ul>

Tabelle 21-2: Phasen eines Vulkanausbruches und damit verbundenes Vorgehen im DWD.

## 5.2 Vulkanaschevorhersageprodukte zur operativen Steuerung

Die Vorhersageprodukte des DWD auf Basis aller verfügbaren Informationen müssen zunächst die ICAO-Standards in Form von VA-SIGMETs- und VA-NOTAM-Vorlagen bedienen. Für die operationelle Steuerung der Flugsicherung soll ein eigens entwickeltes Format genutzt werden, die VA-Konzentrationsvorhersagen.

Während das VA-SIGMET keine Konzentrationsvorhersage ist und sich nach dem Format von ICAO Annex 3 richtet, ist die VA-NOTAM-Vorlage nach den gültigen Vorschriften des ICAO EUR Doc 019 (*Volcanic Ash Contingency Plan*) zu erstellen. Hier werden mäßige und hohe Konzentrationen für unterschiedliche Höhen, für einen

festen Zeitpunkt (+6 Stunden) und für unterschiedliche Lufträume angegeben.

Die VA-Konzentrationsvorhersagen sind eine Eigenentwicklung für den gesamten deutschen Luftraum. Die Deutsche Flugsicherung benötigt im Krisenfall eine stündlich aufgelöste Vorhersage für die gesamte Bundesrepublik, also einen (oder mehrere) Polygonzüge für das Gesamtgebiet oder mit Unterteilung in Lufträume. Mit der Visualisierung in NinJo sind Konzentrationsangaben aus unterschiedlichen Quellen verfügbar. Der verantwortliche Meteorologe soll neben der Konzentrationsvorhersage des VAAC London weitere Informationen aus Sekundärquellen (Modelle und Beobachtungen) verwenden, um letztendlich in einer Zusammenschau Entscheidungen über mögliche Konzentrationen im Luftraum der

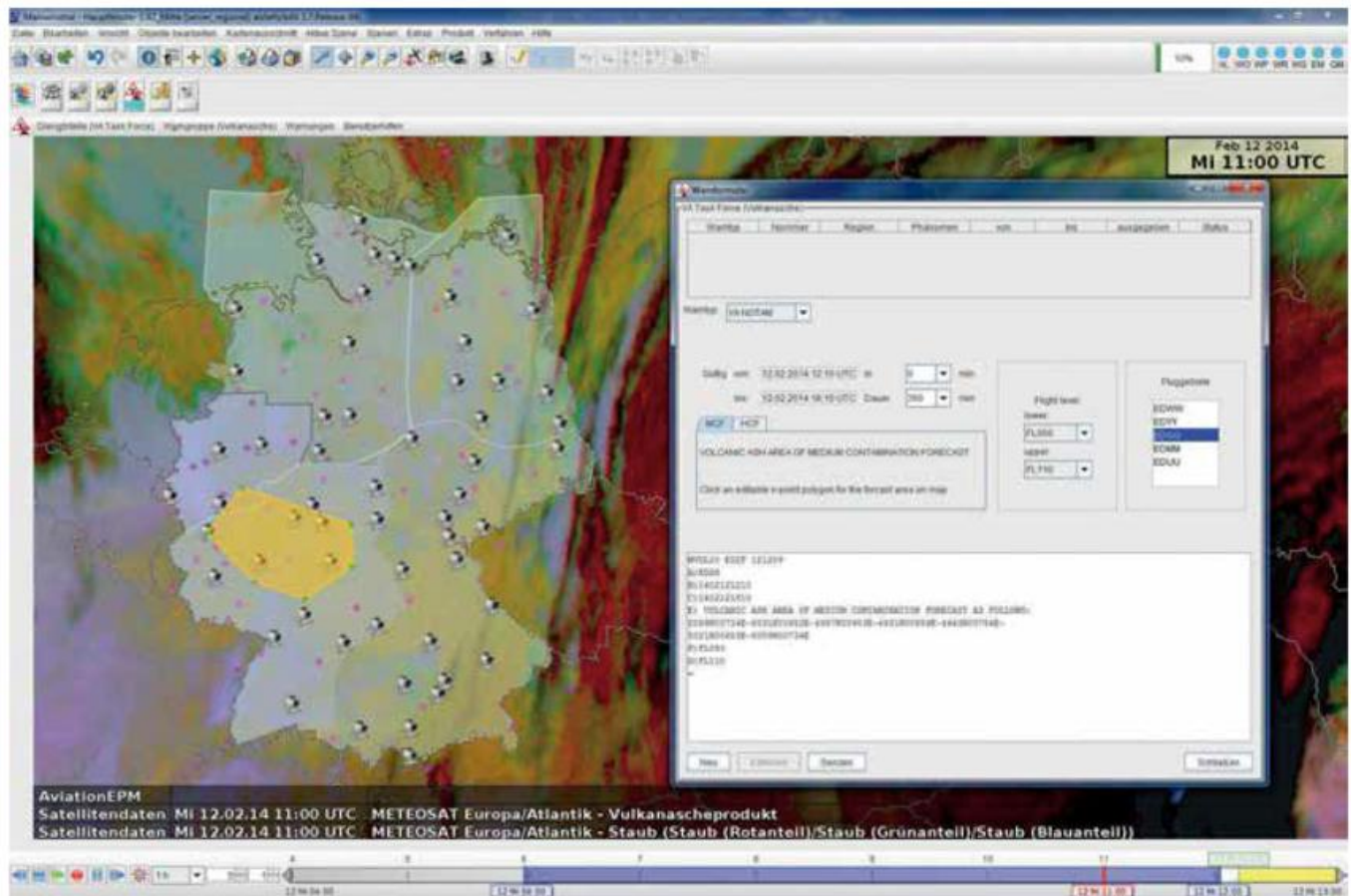


Abb. 21-11: Beispiel für die Erstellung einer NOTAM-Vorlage für die DFS (Text auf der linken Seite des Bildes) aus dem NinJo-System. Mit dem Editions-layer „AviationEPM“ werden die in der Karte eingeklickten Polygonpunkte direkt in das Editionssystem übertragen. Daraus ergibt sich das internationale NOTAM Format in Bulletinform, das anschließend die DFS in ihren Systemen weiterverarbeitet. In NinJo können zur Analyse der Situation in unterschiedlichen Layern Satellitenkanäle und -produkte, Ceilometerstandorte und viele weitere Produkte zur Analyse übereinander gelegt werden.

Bundesrepublik Deutschland zu treffen. Mittels des NinJo-VA-Editors können Polygonzüge erzeugt werden, die automatisch in die jeweiligen Bulletins integriert werden. Ein Auswahlfenster ermöglicht die Wahl verschiedener Datenquellen und/oder der Darstellung aller verfügbaren Koordinaten, so dass der Polygonzug grafisch erzeugt werden kann (siehe Abbildung 21-11). Wenn aktuelle VAAs von VAAC London oder Toulouse vorliegen, und in den VAAs Vulkanasche im deutschen Luftraum vorhersagt wird, müssen zunächst SIGMETs VA gemäß den Vorgaben von den MWOs herausgegeben werden. Die „Task Force Vulkanaschevorhersage“ nimmt die SIGMETs zur Kenntnis und prüft daraufhin alle vorhandenen Datenquellen auf Informationen über vorhandene Vulkanasche und die weitere mögliche Entwicklung.

Gibt es mehrere Hinweise darauf, dass die Vulkanaschekonzentrationen bestimmte „Grenzwerte“ erreichen oder überschreiten (siehe auch Tabelle 21-1), ist zu entscheiden, ob für den deutschen Luftraum Konzentrationsvorhersagen herausgegeben werden. Die Entscheidung fällt nach Rücksprache zwischen den im Dienst befindlichen Mitarbeitern der „Task Force Vulkanaschevorhersage“ und der Abteilungsleitung Flugmeteorologie und kann je nach Erkenntnislage von den Vorhersagen der VAAC abweichen. Die Vorgehenswei-

se zur Verwendung und Interpolation der Koordinaten zu Zwischenterminen wird in der „Task Force Vulkanaschevorhersage“ geregelt.

Als Entscheidungsgrundlagen stehen voraussichtlich beim nächsten Vulkanausbruch folgende Daten zur Verfügung:

- Dateien und Karten der *Volcanic Ash Advisory Center* London und Toulouse,
- COSMO\_ART-Modelldaten in NinJo,
- Satellitenprodukte (überwiegend Meteosat 9) in NinJo,
- Online-Ceilometer und LIDAR-Daten über NinJo oder Internet-Quellen,
- aktuelle Messungen per Flugzeug.

### 6 Zusammenfassung und Ausblick auf zukünftige Herausforderungen („Research Needs“)

Der Ausbruch des isländischen Vulkanes Eyjafjallajökull im Frühjahr 2010 führte zu weitreichenden Luftraumsperrungen über Europa und dem Nordatlantik. Diese Luftraumsperrungen waren die logische Konsequenz aus den Vulkanaschewischenfällen mit Flugzeugen in den 1980er Jahren und der daraufhin von der Internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO empfohlenen „Null-Toleranz-Regel“ hinsichtlich des Fliegens in Vulkanasche. Der Ausbruch des Eyjafjallajökull hat gezeigt, dass die Luftfahrtbetreiber

offensichtlich unvorbereitet waren auf die Folgen eines solchen Vulkanausbruches und das Vorhandensein von Vulkanasche im Luftraum (Messnetz, Grenzwerte, Kommunikationswege, Identifikation von aschefreien Gebieten). Die von zahlreichen Forschungseinrichtungen 2010 aus wissenschaftlichem Interesse durchgeführten Flugzeug- und Bodenmessungen haben wichtige Daten zur Charakterisierung der Situation und zur Modellüberprüfung geliefert.

Nach den Erfahrungen mit den explosiven Vulkanausbrüchen 2010 und 2011 in Island wurden ICAO-Regelungen überarbeitet, Zuständigkeiten neu geregelt und die Möglichkeiten der Detektion und Vorhersage von Vulkanasche verbessert. Um Störungen des Luftverkehrs zu minimieren, wurden Ende April 2010 vorläufige Vulkanaschegrenzwerte für „sicheres Fliegen“ ( $2 \text{ mg m}^{-3}$ ) eingeführt, die nach dem Ausbruch des Grimsvötn 2011 in Deutschland etabliert wurden.

Obwohl der Ausbruch des Eyjafjalla Vulkanes mit 39 Tagen außerordentlich lang dauerte (länger als jeder andere isländische Vulkanausbruch in den vergangenen 30 Jahren), ist der Transport von Asche von einem Vulkanausbruch in Island nach Zentraleuropa kein ungewöhnliches Ereignis. Zukünftige Vulkanausbrüche in Island können durchaus wieder zum Transport von Vulkanasche nach Zentraleuropa führen und es besteht auch die Möglichkeit, dass Aschewolken mit deutlich höheren Massenkonzentrationen auch für längere Zeiten im Luftraum von Deutschland auftreten. Rückblickend zeigt sich, dass der neue Grenzwert für Vulkanasche während des Ausbruchs des Eyjafjallajökull nur zeitweise im westlichen Teil von Deutschland überschritten war und im südlichen Teil von Deutschland im April/Mai 2010 höchstwahrscheinlich nie überschritten wurde.

Als zusätzliches Sicherheitskriterium zu Vulkanaschegrenzwerten wurde von der ICAO empfohlen „Visible Ash“, also Ascheregionen, die vom menschlichen Auge gesehen werden können, zu vermeiden. Die Sichtbarkeit von Vulkanasche ist jedoch von vielen Parametern abhängig wie zum Beispiel der geometrischen Dicke der Ascheschicht, dem Sonnenstand, den mikrophysikalischen und optischen Vulkaneigenschaften oder dem Winkel, unter dem der Beobachter auf die Ascheschicht blickt. Zudem ändert sich die Erscheinung von Vulkanasche drastisch mit zunehmender Entfernung vom Vulkan von einer braunen „Aschewolke“ zu einer grauen Ascheschicht, ähnlich der verschmutzten Grenzschicht, Saharastaub oder Waldbrandaerosol in der Atmosphäre. Mit dem menschlichen Auge können Vulkanascheschichten unter guten Beobachtungsbedingungen (keine Wolken, niedrige Hintergrund-Aerosolkonzentration) schon ab Massenkonzentrationen von  $0,2$  bis  $0,5 \text{ mg m}^{-3}$  sichtbar sein. Jedoch kann das Vorhandensein von Wolken dazu führen, dass Vulkanascheschichten mit Massenkonzentrationen deutlich über dem Grenzwert nicht sichtbar sind. Es ist nicht möglich, visuell zu entscheiden, ob eine Vulkanascheschicht potentiell gefährlich (Aschemassenkonzentrationen  $> 2 \text{ mg m}^{-3}$ ) ist oder nicht. Somit ist „Visible Ash“ nicht quantitativ.

Infolge einer spezifischeren Regulierung und der Definition von Aschegrenzwerten, wird die Vorhersage von Aschegebieten in Zukunft eine größere Herausforderung. War es im Jahr 2010 nur notwendig, die Position der Ascheschicht vorherzusagen, muss mit der neueren Regulierung nicht nur der Ort der Ascheschicht, sondern auch die Aschemassenkonzentration korrekt vorhergesagt werden. Die Aschemassenkonzentration hängt dabei stark von der Emissionsstärke des Vulkanes ab, die nicht nur von Tag zu Tag, sondern sogar innerhalb weniger Minuten variieren kann. Ein weiteres Problem für eine korrekte Vorhersage ist, dass die trockene und feuchte Deposition der Asche im Modell und damit die Auswaschmechanismen gut von den Modellen repräsentiert werden müssen. Jedoch ist die Vorhersage von Niederschlag in globalen und lokalen Modellen bisher eine große Herausforderung (vor allem, wenn es um konvektiven Niederschlag geht).

Um auf zukünftige Vulkanausbrüche vorbereitet zu sein und um einen sicheren Luftverkehr zu gewährleisten, sind verlässliche Tools zur Vorhersage und Detektion von Regionen mit Aschemassenkonzentrationen, die über definierte Grenzwerte hinausgehen, notwendig. Eine effektive Regulierung erfordert nicht nur die Definition von kritischen Aschedosen. Die Aschegrenzwerte müssen in Labortests verifiziert und ggf. an neue Erkenntnisse aus diesen Tests angepasst werden. Ein effizienter Luftverkehr braucht darüber hinaus verlässliche Tools zur Identifikation von „aschefreien“ Gebieten. Die Installation und der Test von Lidarnetzwerken, wie er vom MetOffice und vom DWD betrieben wird, die Entwicklung von satellitengestützten Algorithmen zur Detektion von Vulkanasche und flugzeuggetragene Messungen spielen dabei eine wichtige Rolle. Um zukünftig überflüssige Luftraumsperrungen zu vermeiden, müssen diese prognostischen und diagnostischen Tools zertifiziert und in die Entscheidungsprozesse implementiert werden.

Es müssen neue Instrumente zu einer besseren Vermessung von Vulkanasche getestet werden, und es sind Forschungsanstrengungen zur besseren In-Situ-Detektion der Aschemassenkonzentration notwendig. Es muss dabei sichergestellt werden, dass diese neuen Detektoren in der Lage sind, Vulkanasche von anderen Aerosolen wie Saharastaub und Wasser- und Eiswolken zu unterscheiden. Außerdem muss sichergestellt werden, dass flugzeuggetragene Messungen in der Lage sind, große ( $> 1 \mu\text{m}$ ) Vulkanaschepartikel zu detektieren, die die vorhandene Aschemassenkonzentration dominieren.

## Literatur

ANSMANN, A., TESCHE, M., et al., 2010: The 16 April 2010 major volcanic ash plume over central Europe: EARLINET lidar and AERONET photometer observations at Leipzig and Munich, Germany. *Geophys. Res. Lett.* **37**, L13810.

- BMVBS, 2011: Bekanntmachung der Allgemeinverfügung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung über Regelungen für die Durchführung von Flügen in mit Vulkanaerosol (Vulkanasche) kontaminierten Lufträumen. LR 23/6163.10/3. *BMVBS*, 5 Seiten.
- CASADEVALL, T. J., 1993: Volcanic hazards and aviation safety: Lessons of the past decade. *Flight Safety Foundation, Flight Safety Digest*, 1-9.
- DINGWELL, D. B., 1996: Volcanic dilemma: Flow or blow? *Science* **273**, 1054-1055.
- FLENTJE, H., CLAUDE, H., et al., 2010: The Eyjafjallajökull eruption in April 2010 – detection of volcanic plume using in-situ measurements, ozone sondes and lidar-ceilometer profiles. *Atmos. Chem. Phys.* **10**, 10085-10092.
- GASTEIGER, J., GROSS, S., et al., 2011: Volcanic ash from Iceland over Munich: mass concentration retrieved from ground-based remote sensing measurements. *Atmos. Chem. Phys.* **11**, 5, 2209-2223.
- GROSS, S., FREUDENTHALER, V., et al., 2012: Dual-wavelength linear depolarization ratio of volcanic aerosols: Lidar measurements of the Eyjafjallajökull plume over Maisach, Germany. *Atmosph. Env.* **48**, 85-96.
- GUFFANTI, M., CASADEVALL, T.J., et al., 2010: 1953–2009: Encounters of aircraft with volcanic ash clouds; A compilation of known incidents. *U.S. Geological Survey Data Series* 545, ver. 1.0, 12 pp. plus 14 appendixes including the compilation database, <http://pubs.usgs.gov/ds/545/>.
- ICAO, 2001: Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds. First Edition. Doc 9691-AN/954 variously paged, accessed March 19, 2012, at <http://www.icao.int/safety/meteorology/iavwopsg/Meeting-Documents/IAVWOPSG-2011/Report/Appendix E.pdf>.
- ICAO, 2007: Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds. Second Edition. Doc 9691-AN/954 variously paged, accessed March 19, 2012, at <http://www.paris.icao.int/news/pdf/9691.pdf>.
- KUEPPERS, U., CIMARELLI, C., et al., 2010: Thermal stability of Volcanic ash versus turbine ingestion test sands: an experimental investigation. *Atlantic Conference on Eyjafjallajökull and Aviation*, Keflavik, Iceland.
- LAVALLÉE, Y., VARLEY, N., et al., 2012: Magmatic architecture of dome-building eruptions at Volcán de Colima, Mexico. *Bulletin of Volcanology* **74**, 249-260.
- LEKKI, J., LYALL, E., et al., 2013: Multi-Partner Experiment to Test Volcanic-Ash Ingestion by a Jet Engine. *6th International Workshop on Volcanic Ash; 11-15 March 2013*, Citeko, Indonesia, GRC-E-DAA-TN8284, 22 pp.
- MAYER, B., KYLLING, A., 2005: Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.* **5**, 1855-1877.
- PAPPALARDO, G., MONA, L., et al., 2013: Four-dimensional distribution of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic cloud over Europe observed by EARLINET. *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 8, 4429-4450.
- PETERSEN, G. N., BJORNSSON, H., et al., 2012: The impact of the atmosphere on the Eyjafjallajökull 2010 eruption plume. *J. Geophys. Res.* **117**.
- SAUER, D., GASTEIGER, J., et al., 2013: The Visibility of Airborne Volcanic Ash from the Flight Deck of an Aircraft - The Effect of Clouds in the Field of View. In CAHALAN, R.F., FISCHER, J., Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean. *Amer Inst Physics, Melville*, **1531**, 63-66.
- SCHUMANN, U., WEINZIERL, B., et al., 2011: Airborne observations of the Eyjafjalla volcano ash cloud over Europe during air space closure in April and May 2010. *Atmos. Chem. Phys.* **11**, 5, 2245-2279.
- SIEBERT, L., SIMKIN, T., et al., 2010: Volcanoes of the World. Berkeley.
- STOHL, A., FORSTER, C., et al., 2005: Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys.* **5**, 2461-2474.
- STOHL, A., PRATA, A.J., et al., 2011: Determination of time- and height-resolved volcanic ash emissions and their use for quantitative ash dispersion modeling: the 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Atmos. Chem. Phys.* **11**, 9, 4333-4351.
- SWINDLES, G. T., LAWSON, I.T., et al., 2011: A 7000 yr perspective on volcanic ash clouds affecting northern Europe. *Geology* **39**, 9, 887-890.
- WEINZIERL, B., SAILER, T., et al., 2012a: The Eyjafjalla eruption in 2010 and the volcanic impact on aviation. In SCHUMANN, U., Atmospheric Physics. *Springer-Verlag*, Berlin, Heidelberg.
- WEINZIERL, B., SAUER, D., et al., 2012b: On the visibility of airborne volcanic ash and mineral dust from the pilot's perspective in flight. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **45–46**, 87-102.
- WIEGNER, M., GASTEIGER, J., et al., 2012: Characterization of the Eyjafjallajökull ash-plume: Potential of lidar remote sensing. *J. Phys. Chem. Earth* **45–46**, 79–86.
- WITHAM, C., WEBSTER, H., et al., 2012: Modelling concentrations of volcanic ash encountered by aircraft in past eruptions. *Atmospheric Environment* **48**, 219-229.

A. HOFF, C. DRÜE, H.-R. SONNABEND

# 22 Verkehrsflugzeuge als meteorologische Beobachtungssysteme

## Commercial Aircraft als Meteorological Observing Platforms

### Zusammenfassung

Der physikalische und nachrichtentechnische Teil der auf Verkehrsflugzeugen basierenden meteorologischen Messungen wird erläutert. Das Beispiel des arbeitsteiligen europäischen Flugzeugesystems dient zur Erklärung der Kosten und der Optimierung des Messumfanges. Darüber hinaus werden weitere flugzeugbasierte Systeme vorgestellt. Ein besonderer Teil befasst sich mit den Verfahren und Strategien der Messfehleranalyse bis hin zu den Studien, die sich mit der Wirkung des mengenmäßig großen Messdatenangebotes auf die Qualität der numerischen Vorhersagemodelle befassen. Im Ausblick wird die Perspektive auf eine weltweit standardmäßige meteorologische Funktionalität aller Verkehrsflugzeugflotten eröffnet.

### Summary

The physical and telecommunications part of the meteorological measurements based on commercial aircraft fleets is discussed. The example of the European aircraft measurement system serves to explain the costs and subsequent optimization of the data volume. In addition, other aircraft based systems are presented. A special section deals with the methods and strategies of error analysis as well as with impact studies for numerical forecast models. Finally, a perspective view is opened to a world standard meteorological functionality of all commercial aircraft.

### 1 Motivation und Geschichte

In den 1970er Jahren wurde ein auf Verkehrsflugzeuge gesondert installierbares System erprobt, das nur meteorologische Messdaten der standardmäßigen Flugzeuginstrumentierung für Druck, Temperatur und Wind über geostationäre Satelliten an die Wetterdienste meldete. Es trug den Namen ASDAR (*Aircraft to Satellite Data Relay*). Ein großer Antennenbehälter wurde am vorderen Fußteil des Seitenleitwerks von Verkehrsflugzeugen montiert. ASDAR war die erste in die Tat umgesetzte Idee, Verkehrsflugzeuge als unmittelbar meldende meteorologische Beobachtungssysteme zu verwenden.

Im Lauf der neunziger Jahre ging die Nutzung des ASDAR zurück. Parallel in den 1970er Jahren wurde ein weltweites digitales Datenfunksystem für den Flugverkehr aufgebaut, das den vor allem über Ballungsgebieten überfrachteten Sprechfunk systematisch entlasten sollte: *Aircraft Communications Addressing and Reporting System* (ACARS). Eine Fluggesellschaft, die ihre Flotte mit diesem System ausstatten ließ, bekam damit eine effiziente Übersicht über Ort und Betriebszustand aller Flugzeuge. Weltweit verteilt gibt es Sendeempfangsanlagen (engl.: Radio Ground Stations oder Transceiver Stations), die zumindest über Land den nahezu permanenten Datenaustausch ermöglichen. Je

nach Ausrüstungs- und Konfigurationszustand der Flugzeuge werden die Daten gegebenenfalls auch über den teureren Satellitenweg, wie zum Beispiel Inmarsat, übertragen. Die Funknetzbetreiber sind die Firmen *Aeronautical Radio Inc., USA* (ARINC) oder *Société Internationale de Télécommunication Aéronautique, Europe* (SITA).

Eine kleine Untermenge der von den Flugzeugen an ihre Betriebszentrale übertragenen Daten sind atmosphärenphysikalische Parameter, die luftfahrtstandardmäßig gemessen werden, weil sie für die Flugführung unverzichtbar sind:

- die Flughöhe, über die internationale Standardatmosphäre (ISA) abgeleitet aus dem Umgebungsdruck,
- die sogenannte statische Temperatur (ungestörte Umgebungstemperatur),
- der Windvektor in Form von Geschwindigkeit und Richtung.

Diese meteorologische Informationsquelle wurde ab den späten achtziger Jahren in den USA für die *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) nutzbar gemacht. Unter dem Akronym *Meteorological Data Collection and Reporting Service* (MDCRS) wurde der ACARS-Kommunikationsprozess so konfiguriert, dass für jede Flugphase in geeigneten Abtastzeiten (zum Beispiel 10 Sekunden, 1 Minute oder 10 Minuten) meteorologische Messungen er-

folgen und diese Daten von dem Funknetzbetreiber ARINC unmittelbar an die NOAA-Institute abgezweigt werden. Ab den neunziger Jahren kamen die Regionen Europa, Australien/Neuseeland, Südafrika, Hongkong, Japan und auch China mit ähnlichen Konzepten der Nutzung der bord-eigenen Mess- und Kommunikationssysteme dazu.

Damit entstand weltweit neben einer ergiebigen Überdeckung mit Streckenmessdaten in der oberen Troposphäre zusätzlich zu den existierenden Radiosondenmessungen eine Vielzahl von Vertikalprofilen, gebietsweise in hoher zeitlicher und räumlicher Dichte. Deren besonderer Nutzeffekt erwuchs mit der unabhängig parallel einhergehenden Steigerung der räumlichen Auflösung der numerischen Atmosphärenmodelle für die Wettervorhersage.

Diese Steigerung der prinzipiell verfügbaren Messungen aus der freien Atmosphäre durch die Hereinnahme der Flugzeugmessungen ist vergleichsweise preiswert. Der finanzielle Aufwand für Datenerfassungs- und Datenverarbeitungsprogramme an Bord der Flugzeuge und für die Dateninfrastruktur am Boden verteilt sich auf sehr viele Vertikal- und Streckenprofile. Von den Feuchtemessungen zunächst noch abgesehen, betragen die Messdatenkosten umgelegt auf die Vertikalprofile wenige Prozent derer von Radiosonden. Der Aufwand der grundlegenden Qualitätssicherung, also die Systemwartung, liegt auf der flugbetrieblichen Seite, da die Einhaltung der Messgenauigkeit zulassungskritisch für den Betrieb der Flugzeuge selbst ist.

Als Name für diese meteorologische Nutzung von Luftfahrtkommunikationstechnik wird weltweit der Begriff *Aircraft Meteorological Data Relay* (AMDAR) verwendet. Die Grundfunktionalität der Messstrategie basiert auf den luftfahrtstandardmäßig immer in gleicher Weise auf den Flugzeugen vorhandenen Sensoren und Avionikkomponenten (Avionik = Aviatik-Elektronik = elektronische Navigations-, Steuerungs- und Nachrichtensystemtechnik auf Flugzeugen).

Eine annähernd gleichwertige Ergänzung von Radiosondenaufstiegen durch Flugzeugmessungen kann aber nur dann erfolgen, wenn die Flugzeuge auch in der Lage sind, die Luftfeuchte zu messen. Diese Instrumentierung ist rein flugbetrieblich bislang nicht erforderlich. Somit muss ein für die kommerzielle Luftfahrt akzeptables Sensorsystem in die Flugzeuge integriert werden. Durch die NOAA wurden ab 2004 bereits 25 Flugzeuge eines Frachtflugbetriebes und seit 2009 sukzessive Passagierflugzeuge einer Verkehrsfluggesellschaft mit Feuchtesensoren ausgestattet. Der europäische Verbund der Wetterdienste *Economic Interest Grouping EUMETNET* (EIG EUMETNET) hat ab 2007 die ersten drei Flugzeuge seiner Flotte mit Feuchtesensoren bestückt.

Im Rahmen der *World Meteorological Organisation* (WMO) wurde 1998 auf der Basis eines „Trust Fund“ ein gesondertes in seiner personellen Besetzung offenes Gremium, das WMO-AMDAR-Panel, eingerichtet, das eine koordinierende und standardisierende Funktion ausübt.



Abb. 22-1: Die Messpositionen für statischen Druck, Auftreffdruck, Temperatur und Vereisung an einem Airbus A319 (Foto: Björn Schmitt). Oben rechts ist die Nahaufnahme des Pitotrohrs (Auftreffdruck) und des TAT-Gehäuses (Temperatur) auf der Backbordseite eines Embraer-Flugzeugtyps (Foto: Lufthansa AG) zu sehen.

Neben dem AMDAR-Reference Manual (PAINTING, 2003) wurde auch der entsprechende Abschnitt im CIMO-Guide (WMO Nr. 8, Teil II, Kapitel 3) zu einer weltweiten Richtlinie. Ebenfalls unter dem WMO-Schirm entstanden die Normen für die meteorologische Programmierung der Prozessoreinheiten, die ACARS an Bord der Flugzeuge betreiben (siehe auch Kapitel 2.1.2).

Neben AMDAR haben sich weitere funknetz-basierte Systeme gebildet, die Atmosphärendaten von Verkehrsflugzeugen den Wetterdiensten anbieten. Das System *Tropospheric Airborne Meteorological Data Reporting* (TAMDAR) ist ein eigenes, gesondert auf dem Flugzeug zu montierendes Modul an Sensoren inklusive einer Feuchte- und Vereisungsmessung. Es steht in Verbindung mit den Datenbussen des Flugzeugs, um über die Navigationsdaten auch die Windinformation ableiten zu können. Die Messergebnisse gehen über das IRIDIUM-Satellitennetzwerk an die Zentrale des Systembetreibers. Wetterdienste können die Online-Zustellung der Daten über Exklusivverträge käuflich erwerben.

Seit 2006 werden alle Verkehrsflugzeuge mit Transpondern der *Automatic Dependent Surveillance* (ADS-B oder ADS-C) ausgestattet. Sie senden hauptsächlich Positions- und Bewegungsdaten für Flugsicherungszwecke. Eine Untermenge der gesendeten Daten sind auch wieder die Meteorologischen.

Ein anderes Transponder-System basiert auf Radar: Mode S. Auch hier wird ein Teil der meteorologisch relevanten Daten übermittelt. Alle Flugzeuge mit geeigneten Transpondern im Abdeckungsfeld eines Flugüberwachungs-Radars liefern dadurch permanent Atmosphärendaten. Seit 2004 ist diese Ausstattung für alle Flüge nach Instrumentenflugregeln obligatorisch.

Einzelne der für wetterdienstliche Routinemessaufgaben konfigurierten Verkehrsflugzeuge werden darüber hinaus in gesondertem Auftrag wissenschaftlicher Atmosphä-

rennmesprojekte als Messplattformen für Luftchemie und Partikelphysik verwendet (MOZAIC, IAGOS, CARIBIC).

## 2 Die wetterdienstlich genutzten flugzeugbasierten meteorologischen Beobachtungssysteme

### 2.1 AMDAR

#### 2.1.1 Messphysik

An Bord jedes Verkehrsflugzeuges werden in hoher Abtastrate (1 bis 10 Hz) sowohl thermo- und aerodynamische als auch flugdynamische Messgrößen erfasst und den bordeigenen Datenbussen verfügbar gemacht. Unter anderem sind es die folgenden Parameter:

- Umgebungsdruck (Rohwert) an den in Abb. 22-1 gezeigten Statik-Druckmessöffnungen,
- Auftreffdruck oder Gesamtdruck (Rohwert) an den in Abb. 22-1 gezeigten Pitot-Rohren,
- Gesamttemperatur (Rohwert) aus den in Abb. 22-1 gezeigten Temperaturmessvorrichtungen,
- Steuerkurs aus dem Navigationssystem,
- Flugzeuggeschwindigkeitsvektor über Grund aus dem Navigationssystem,
- Position aus dem Navigationssystem,
- Vereisung aus speziellem Sensor.

Diese Rohmessgrößen werden benötigt, um an Bord in einer mehrstufigen Echtzeitprozedur (HOFF et al. 2013) die für die Meteorologie verwendbaren Werte zu erhalten:

- a) Umgebungsdruck (statischer Druck) beziehungsweise geopotentielle Druckhöhe nach ISA (oder ICAO),
- b) Umgebungstemperatur (so genannte statische Temperatur),
- c) horizontale Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

Die Größen a) bis c) sind aus rein flugbetrieblichen Gründen standardmäßig auf jedem Verkehrsflugzeug verfügbar. Damit diese Messsystemträger als gleichwertige Ergänzung oder sogar als teilweiser Ersatz von Radiosonden fungieren können, ist es erforderlich, auch eine Messgröße für die

- d) Luftfeuchte

zu erfassen. Auf weltweit mehr als 100 Maschinen wird das bereits heute (2013) praktiziert. Die Messung dieser Größen erfolgt in einer zeitlichen Auflösung von Sekunden bis Minuten. die Erfassung turbulenter Fluktuationen, auch die des dreidimensionalen Windvektors in einer Zeitskala von kleiner als 0,1 Sekunde, erfolgt nicht auf Verkehrsflugzeugen sondern nur auf speziell ausgestatteten wissenschaftlichen Messflugzeugen. BÖGEL und BAUMANN (1991) beschreiben hierzu spezielle Kalibrationsverfahren und nennen weiteres Quellenmaterial. Dennoch sollen die Verkehrsflugzeuge

e) Turbulenzparameter messen. Nicht mithilfe hochauflösender Windvektormessungen sondern basierend auf Vertikalbeschleunigungsdaten des Trägheitsnavigationssystems und auf den

Signalen der Anstellwinkelsensoren werden Turbulenzstatistiken bereits in Prototypen-Programmen auf Flugzeugen von Delta Airlines, Southwest Airlines, United Airlines, American Airlines und zum Teil Air France erfasst. Unter der Regie der FAA (US-amerikanische Luftfahrtbehörde) wird an einer Standardisierung und damit einer Portierbarkeit auf unterschiedliche Borddatensysteme gearbeitet.

Die Parameter wie

- f) Höhenmesswert des Satellitennavigationssystems (für eine direkte Ableitung der geopotentiellen Höhe)
- g) Vereisung
- h) luftchemische und partikelphysikalische Größen

werden in den kommenden Jahren sukzessive in das weltweite meteorologische Netz eingespeist. Die Partikelsensorik ist auch durch die Vulkanascheproblematik im Rahmen des Flugverkehrs von besonderem Interesse der Fluggesellschaften.

In Hoff et al. (2013) und Vörsmann et al. (1989) werden die oben genannten Verfahren eingehender erläutert. Eine umfassende und gleichzeitig detaillierte Übersicht aller flugzeugtragenden Messverfahren findet sich in WENDISCH und BRENGUIER (2013). Im Folgenden wird lediglich auf den Parameter der Luftfeuchte weiter eingegangen, der im Vergleich zu weiteren denkbaren Messgrößen auf Verkehrsflugzeugen die höchste Priorität für die Wetterdienste hat.

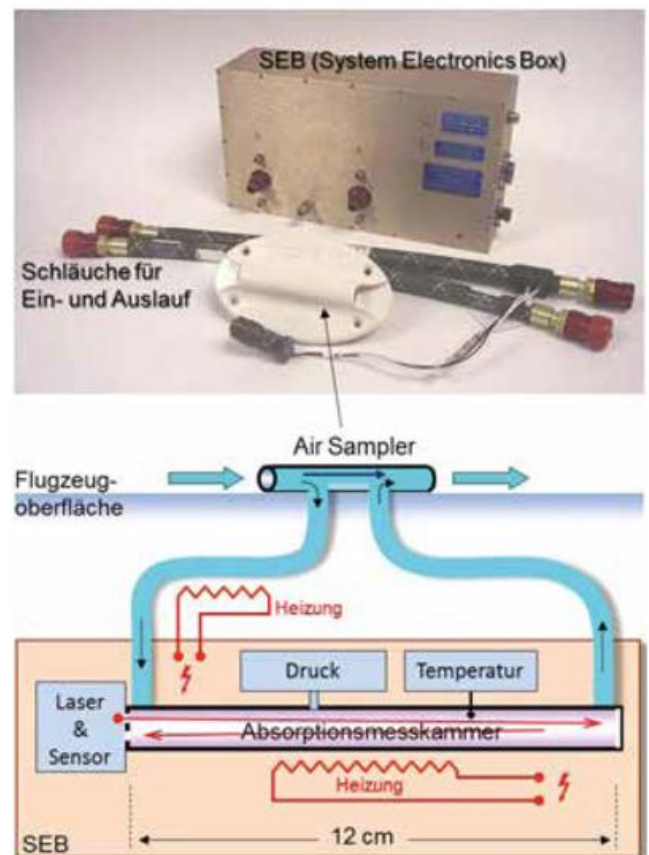


Abb. 22-2: Der Aufbau des in AMDAR verwendeten Feuchtemesssystems von SpectraSensors Inc., USA, Typ WVSS II. Der untere Teil der Abbildung gibt das Funktionsschema wieder. Die fotografische Abbildung oben zeigt die in das Flugzeug einzurüstenden Komponenten. Das Kabel ist für die Beheizung des Zulaufschlauches.

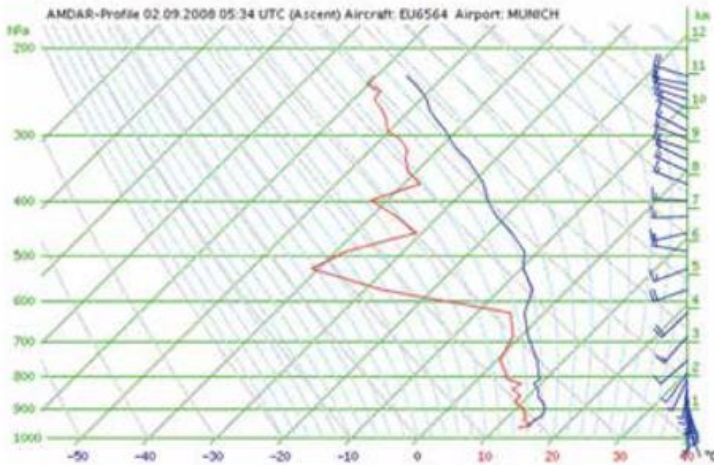


Abb. 22-3: Beispiel des Vertikalprofils (T-logP-Diagramm) eines mit Feuchtesensor ausgestatteten Flugzeuges der Lufthansa-Flotte. Blaue Linie: Trockentemperatur, rote Linie: Taupunkt, rechte Skala: Hodogramm.

Im *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) in Pasadena, Kalifornien, wurde ein Verfahren entwickelt, das auf einem abstimmbaren Dioden-Laser (TDL, *Tunable Diode Laser*) basiert (MAY und WEBSTER 1993). Wenn eine Gasbeimengung, wie in diesem Fall der Wasserdampf, Absorptionsbanden separat von denen der trockenen Gasmischung Luft hat, dann sind diese für ein Absorptions- oder Streuungsmessverfahren geeignet. Das System mit dem Produktnamen *Water Vapor Sensing System II* (WVSS-II) des Herstellers SpectraSensors Inc. wendet das Verfahren des JPL für eine Absorptionsbande bei 1,37 µm (Infrarot) an. Periodisch durchfährt der TDL die Wellenlängen im Bereich dieser Bande. Der damit entstehende zeitliche Verlauf des Absorptionssignals wird durch ein in der Firmware abgelegtes numerisches Verfahren zusammen mit der lokalen Druck- und Temperaturmessung in den Parameter des Wasserdampfmassemischungsverhältnisses umgerechnet, der als Ausgangsgröße zur Verfügung steht. Das Signalanalyseverfahren benötigt eine herstellerseitige Kalibration individuell für jedes Sensorexemplar. Für einen konstanten Betrieb auf einem Flugzeug über mehr als 2 Jahre ohne Drifteffekte braucht es eine hohe Standfestigkeit aller mechanischen und elektronischen Bauteile des Systems.

In der Abb. 22-2 ist der Aufbau des Systems skizziert. Der Laserstrahl wird am Ende der 12 cm langen Messkammer gespiegelt und durchläuft die Luftsäule damit zwei Mal. Lokal innerhalb der Messkammer werden sowohl Temperatur als auch Druck gemessen. Das derzeitige Ein- und Auslaufprinzip für die Messluft besteht aus einer auf der Außenhaut des Flugzeugrumpfes montierten Durchlaufvorrichtung, dem sogenannten „*Air Sampler*“. Durch die flache Auslegung dieser Vorrichtung ist der mögliche Ansatz von Eis auf der Außenkante ausreichend klein, so dass eine elektrische Enteisungsbeheizung nicht erforderlich wird und sich damit der luftfahrtmäßige Zulassungsprozess für den Flugzeugeinbau in engeren Grenzen hält.

Die Abzweigung und Wiederzuleitung des Messluftstromes ist aerodynamisch so ausgelegt, dass der Druck in dem zu durchlaufenden Messsystem etwa beim Außendruck liegt. Die Nähe des internen Betriebsdruckes zum Umgebungsdruck kann aber bei hoher relativer Feuchte zu einem ungewollten Kondensations- oder Sublimationsprozess innerhalb des Messgasstromes führen. Also werden der Zulaufschlauch aber viel mehr noch die Kammer, in der der Absorptionsprozess des Lasers stattfindet, so beheizt, dass in ihr die Temperatur immer oberhalb des weltweit höchstmöglichen Taupunktes gehalten wird (etwa 35 °C).

Das Funktionsprinzip dieses Sensors eröffnet die Perspektive, auch Wasserdampfübersättigungen messen zu können. In einer Kombination mit geeigneter Partikelsensorik ließen sich bei Messereignissen der Übersättigung über Eis bei einer nachweislich klaren, also partikelfreien Luft, die Bereiche aufdecken, in denen sich Kondensstreifen bilden (ISSR, *Ice-Supersaturated Regions*). Genauere Details über die Zusammenhänge zwischen den Rahmenbedingungen in der oberen Troposphäre und den Flugzeugabgasen sind bei SCHUMANN (1996) zu finden.

Der europäische Verbund der Wetterdienste, die wirtschaftliche Interessengemeinschaft EIG EUMETNET (*Economic Interest Grouping European Meteorological Services Network*), hat bislang drei Lufthansa-Flugzeuge des Typs Airbus A 319 mit diesen Sensoren bestückt. In Abb. 22-3 ist das Beispiel des Vertikalprofils eines mit Feuchtesensor ausgestatteten Flugzeuges gezeigt. Im Auftrag von EUMETNET kommen in der Lufthansa-Flotte in 2014 weitere 6 mit Feuchtesensoren bestückte Flugzeuge hinzu.

In der MDCRS-Flotte der NOAA sind seit Ende 2013 mehr als 100 Flugzeuge (UPS, Southwest Airlines) mit den beschriebenen Sensoren ausgestattet worden. Derzeit (Februar 2013) sind etwas mehr als 70 Flugzeuge bestückt. Die Abb. 22-4 zeigt die Überdeckung der USA mit Feuchtemessungen genau dieses Sensortyps.



23-Mar-2014 16:00:00 – 24-Mar-2014 16:47:00 (58194 obs loaded, 58158 in range, 17541 shown)  
NOAA / ESRL / GSD Altitude: -10000 ft. to 45000 ft. vapor

Abb. 22-4: Verteilung der Feuchtemessungen von mehr als 100 Flugzeugen im Lauf von 24 Stunden über den USA. Die Messhöhen sind an der Färbung der Punkte erkennbar (siehe Legende rechts).

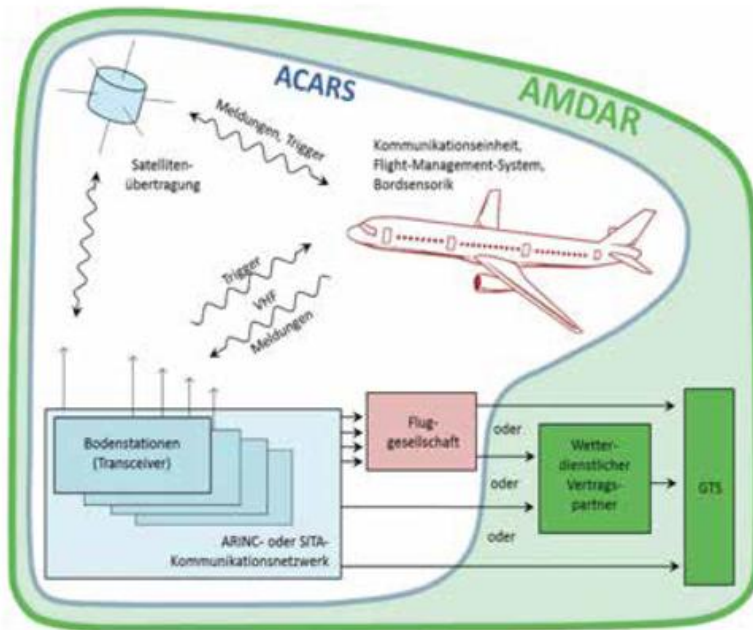


Abb. 22-5: AMDAR (*Aircraft Meteorological Data Relay*) auf der Basis des Bord Boden-Kommunikationssystems ACARS (*Aircraft Communications Addressing and Reporting System*).

**2.1.2 Dateninfrastruktur auf flugbetrieblicher Seite**

Die Bereitschaft von Fluggesellschaften zur Teilnahme an AMDAR ist nicht ganz uneigennützig. Auch wenn die meteorologischen Beobachtungsdaten der Flugzeuge nur bedingt direkt genutzt werden können, so erwarten die Fluggesellschaften durch die vermehrten Beobachtungsdaten eine deutliche Verbesserung der Vorhersagen im Flugwetterdienst. Besonders Interesse liegt hierbei in den Wind- und Temperaturvorhersagen in der Atmosphäre bis Flugfläche 530 (circa 16 000 m), welche direkt in eine genauere Flugwegplanung und Treibstoffberechnung pro Flug Eingang finden.

Die weltweit betriebenen AMDAR-Systeme, mit ihren regionalen Schwerpunkten in Nordamerika, Europa, Ostasien, Australien, sind in ihrer technischen Grundstruktur nahezu identisch. Sie unterscheiden sich nur in den verwendeten Software-Modulen im Flugzeug oder in der Art der Datenübermittlung vom Flugzeug an die Wetterdienste.

Alle modernen Verkehrsflugzeuge sind in der Regel mit ACARS ausgestattet, welches eine schnelle und zuverlässige Übertragung von Nachrichten von und zum Flugzeug ermöglicht. Die Verbindung wird entweder über eine feste Bodenstation (Radio-Ground-Station) oder in Gebieten ohne eine solche Station auch über Satellit hergestellt. Dabei wird automatisch immer die kostengünstigste Verbindungsart

und, wenn mehrere Netzbetreiber zur Verfügung stehen, auch der preiswerteste Anbieter ausgewählt.

Abbildung 22-5 gibt einen schematischen Überblick über das Zusammenwirken von ACARS und AMDAR sowie die verschiedenen Kommunikationswege.

Um ein Flugzeug AMDAR-fähig zu machen, wird eine spezielle Software im Flugzeug benötigt. Dieses Programm ist in der Regel in der ACARS MU (*Management Unit*) implementiert und muss an den jeweiligen Flugzeugtyp angepasst werden. Trigger-Meldungen vom Boden zum Flugzeug konfigurieren den gegebenenfalls durchzuführenden Messprozess. Das Programm im Flugzeug hat die Aufgabe, aus den vom Flugzeug bereitgestellten Daten gemäß den Anforderungen einen AMDAR-Report zu erstellen und zu verschicken.

Die Abb. 22-6 gibt eine Übersicht über die AMDAR-Einstellungen während der verschiedenen Flugphasen.

**2.1.3 Das Beispiel des europäischen AMDAR-Gesamtsystems**

Innerhalb EUMETNET ist das Programm E-AMDAR (EU-METNET-AMDAR) angesiedelt. Ziel dieses Programms ist es, in Zusammenarbeit mit europäischen Fluggesellschaften meteorologische Beobachtungsdaten zu sammeln.

E-AMDAR besteht derzeit aus einer Arbeitsteilung zwischen den Partner-Wetterdiensten DWD, FMI, KNMI, Météo France, SMHI und UK-Met-Office. Diese Wetterdienste sind es, die Verträge mit mittlerweile mehr als 10 Fluggesellschaften unterhalten. Die schematische Übersicht in Abb. 22-7 gibt einen Überblick über das gesamte E-AMDAR-System und die Verantwortlichkeiten der einzelnen Partner.

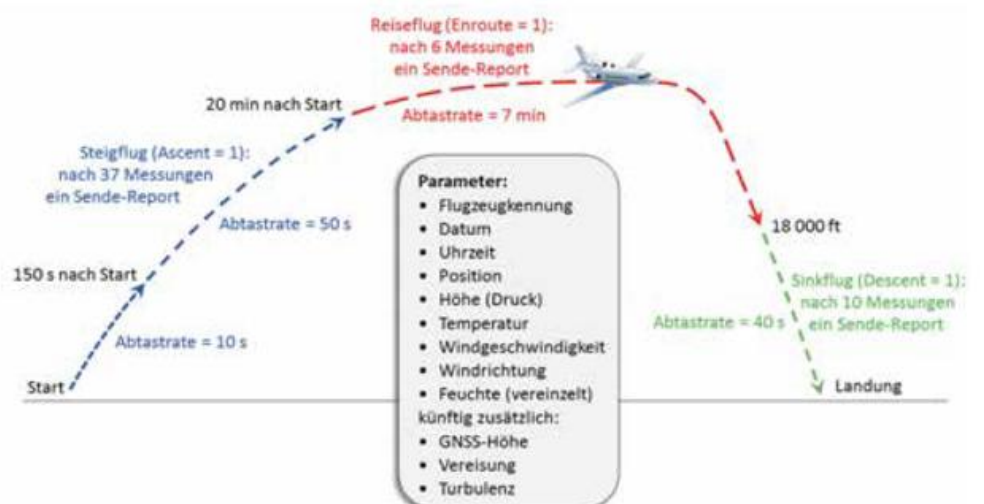


Abb. 22-6: AMDAR Report-Erstellung. Alle Messintervalle, Zeiten oder Höhen sind per Trigger-Meldung konfigurierbar. Die hier gezeigten Werte sind die derzeitigen (2013) Einstellungen auf der Lufthansa-Flotte.

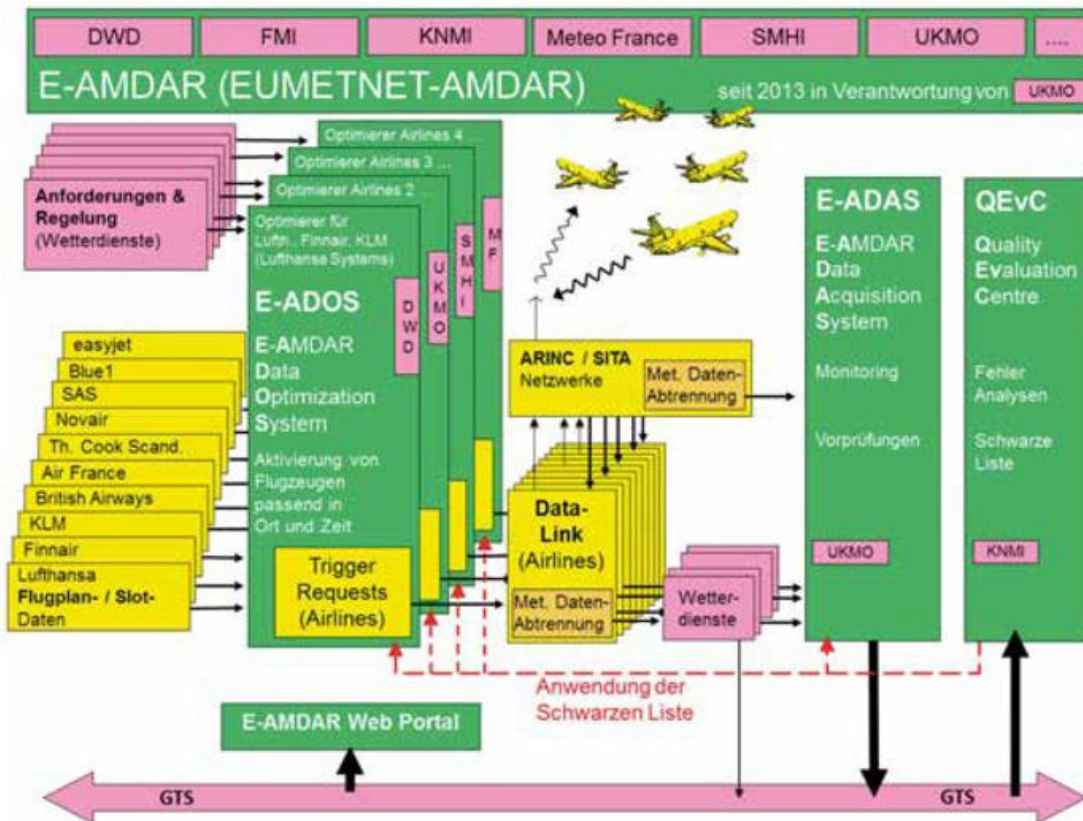


Abb. 22-7: Arbeitsteilung im Datenfluss von EUMETNET-AMDAR. Die unmittelbaren Verantwortungsbereiche sind farblich hinterlegt.

- Wetterdienste
- E AMDAR
- Fluggesellschaften

Bei Aktivierung sämtlicher AMDAR-fähigen Flugzeuge ergäbe sich an verkehrsreichen Flughäfen ein Übermaß an Vertikalprofilen, das für die Nutzung in den synoptischen, numerischen und klimatologischen Anwendungen keinen zusätzlichen Gewinn brächte. Es gilt, die Zahl der Profile in Zeit und Raum auf ein durch die Wetterdienste zu spezifizierendes Maß zu begrenzen, so dass eine größtmögliche Messüberdeckung in Zeit und Raum bei minimaler Aktivierung der

kostengebundenen Funkübertragung entsteht. Die Entscheidung, welches Flugzeug welche Messungen durchführen soll, wird von verschiedenen nebeneinander agierenden Optimierungssystemen getroffen. Eines dieser Systeme ist E-ADOS (*E-AMDAR Data Optimisation System*). Es optimiert die AMDAR-Flotten der Lufthansa Gruppe (Lufthansa Passage, Lufthansa Cargo, Lufthansa CityLine und Germanwings), Finnair sowie KLM unter Berücksichtigung aller operativen Meldungen (kurzfristige Flugplanänderungen) der Fluggesellschaften und gemäß den Anforderungen der Wetterdienste. Profil-Aktivierungen werden über die Auswahl von Flughäfen und zugeordneten Zeitrastern ermöglicht.

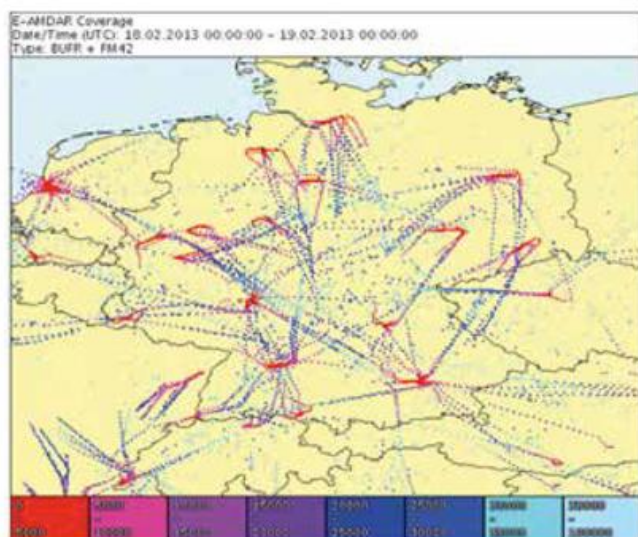


Abb. 22-8: E-AMDAR-Einzelmessungen eines kompletten Tages über Deutschland. Jede Meldung ist durch einen Punkt dargestellt. Die Farbe jedes Punktes zeigt die Druckhöhe der Messung an.

Unabhängig von der Flottenzugehörigkeit wird jenes Flugzeug ausgewählt, das am nächsten zu der erforderlichen Zeit an dem mit einem Profil zu belegenden Flughafen ist. Eine entsprechende Trigger-Nachricht wird zeitnah an das ausgewählte Flugzeug gesendet. Zur Kostenersparnis werden alle übrigen Flugzeuge über dementsprechende Trigger-Meldungen deaktiviert. Darüber hinaus ermöglichen diese Systeme neben zielgerichteten Anforderungen (Targeted Observation), um signifikante Wettersituationen besser zu erfassen, auch gezielte Deaktivierung der Datenbereitstellung von Flugzeugen mit fehlerhaften Messungen (schwarze Liste).

Die meteorologischen Meldungen der Bord-Boden-Kommunikation kommen auf unterschiedlichen Wegen an die E-AMDAR-Datenerfassungsstelle E-ADAS (*E-AMDAR*

	Flugzeuge, messbetrieblich verfügbar	Einzelmessungen pro Tag
DWD	357	17 000
E-AMDAR	1 038	40 000
AMDAR weltweit	4 000	350 000

Tab. 22-1: Die Anzahl der für AMDAR-Betrieb verfügbaren Flugzeuge und der tägliche Umfang an Flugzeugmeldungen im Jahr 2013 differenziert nach DWD, E-AMDAR und weltweit.

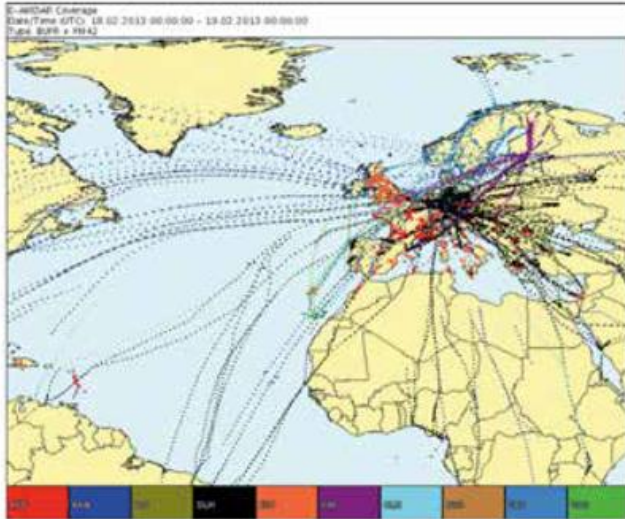


Abb. 22-9: 24-stündige Überdeckung des EUMETNET-Messgebietes. Die Farbkodierung bezieht sich auf die unterschiedlichen Fluggesellschaften:

AFR	=	Air France
BAW	=	British Airways
BLF	=	Blue 1
DLH	=	Lufthansa
EZY	=	easyJet
FIN	=	Finnair
KLM	=	Koninklijke Luchtvaart Maatschappij
NVR	=	Novair
SAS	=	Scandinavian Airlines
VKG	=	Thomas Cook Scandinavia (Viking)

Data Acquisition System), wo weitere Kontrollprozesse und die endgültige Einspeisung in das GTS (*Global Telecommunication System*) der Wetterdienste erfolgen. Nahezu ausnahmslos gehen die Messdaten aller EUMETNET-Partner vor der Eingabe in das GTS ihren Weg über E-ADAS. Innerhalb der ersten halben Stunde nach der Messung sind mehr als 90 % der Daten verfügbar.

Die unmittelbar im Anschluss stattfindende Qualitätskontrolle der Messdaten wird unter anderem von dem *Quality Evaluation Centre* (QEvC) vorgenommen (siehe EUMETNET Observations Quality Monitoring: <http://eucos.dwd.de/mon/#r>). Auffällige Flugzeuge werden schnellstmöglich aus dem Meldebetrieb genommen.

Unter der Verantwortung von E-AMDAR steht auch ein Web-Portal für das Moni-

toring des Messbetriebes zur Verfügung.

Die Größe der E-AMDAR-Flotte beträgt mittlerweile mehr als 1000 Flugzeuge (siehe auch Tab. 22-1). Der DWD steht mit Lufthansa unter Vertrag, die mit mehr als 350 Flugzeugen beteiligt ist. E-ADAS erhält von den europäischen Flugzeugen täglich 40 000 Einzelmessungen mit jeweils Kennung, Position, Druckhöhe, Temperatur, Wind und teilweise Feuchte. Weltweit sind circa 4 000 Flugzeuge in AMDAR eingebunden.

Insgesamt weltweit sind auf der Basis von 4000 Flugzeugen täglich 350 000 Einzelmessungen im GTS verfügbar. Diese im Vergleich zu Europa unverhältnismäßig größere Zahl liegt an der in den USA bislang nicht erforderlichen Optimierung der Meldeaktivität der Flugzeuge.

Die flächenmäßige Überdeckung Deutschlands mit AMDAR-Messungen, die während eines Zeitraums von 24 Stunden gewonnen wurden, ist in der Abb. 22-8 zu erkennen. Die Flughöhe ist farbig kodiert.

Eine typische 24-Stunden-Abdeckung über dem gesamten EUMETNET-Gebiet ist in Abb. 22-9 gezeigt. Die Farbkodierung markiert die unterschiedlichen beteiligten Fluggesellschaften.

Die Messaktivitäten von E-AMDAR außerhalb des EUMETNET-Bereiches (siehe Abb. 22-10) sind

- der WWW-Beitrag, der weltweit gemäß einer WMO-Vereinbarung geleistet wird,
- oder mit einzelnen Wetterdiensten vertraglich abgestimmt (zum Beispiel Singapur, Südafrika).

AMDAR erzeugt über Flughäfen eine zeitliche Dichte von Vertikalprofilen, die weit über das hinausgeht, was ein Netzwerk an Radiosondenstationen üblicherweise bietet.

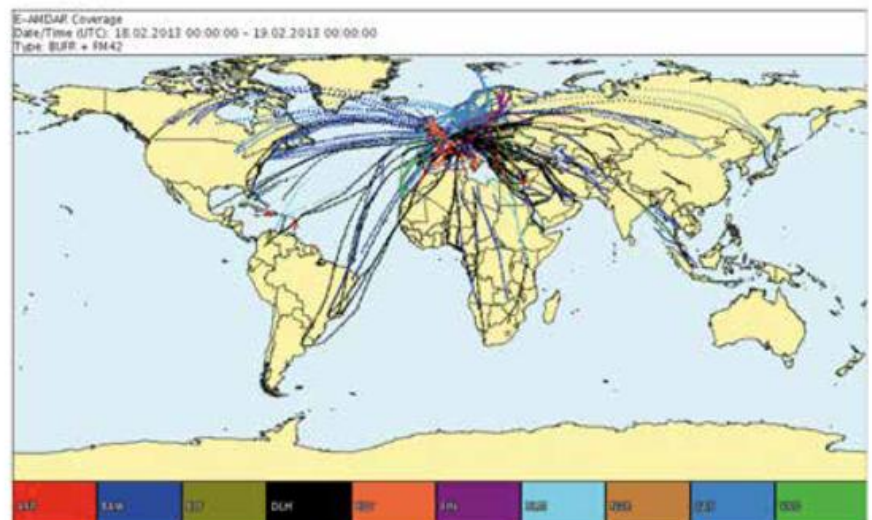


Abb. 22-10: 24-stündige weltweite Überdeckung des E-AMDAR-Messbetriebes. Die Farbkodierung ist wie in Abb. 22-9 bezogen auf die Fluggesellschaften.

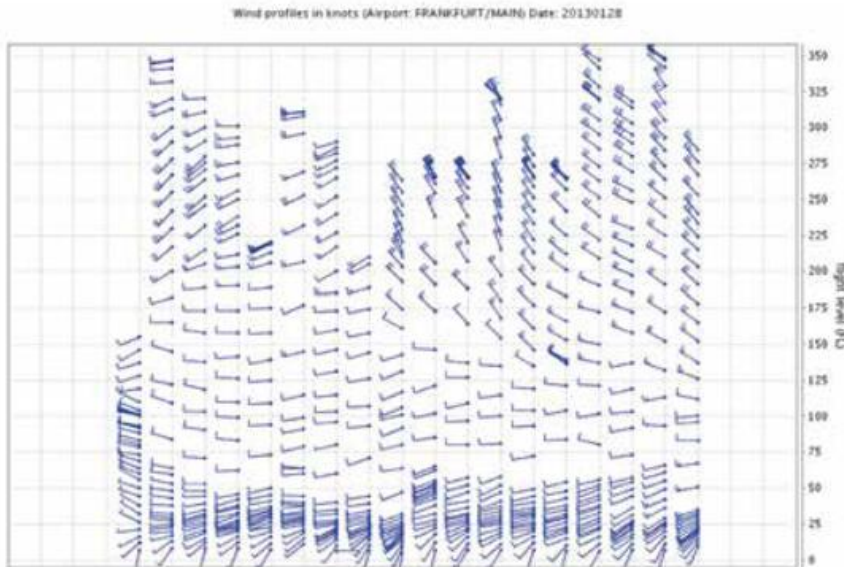


Abb. 22-11: 24-Stunden-Zeitreihe der AMDAR-Hodogramme, an einem hoch frequentierten Flughafen (Beispiel Frankfurt/Main).

Für die Arbeit der beratenden Meteorologen im Flugwetterdienst sind zum Beispiel die Zeitreihen der aus AMDAR-Messungen erzeugten Hodogramme von besonderem Wert. Zeitabläufe mesoskaliger Phänomene und Strukturen lassen sich viel präziser identifizieren, als mit der Analyse der Wetterlage auf der Basis konventioneller Radiosondennmessungen, von denen es bestenfalls 4 pro Tag und Standort gibt. Ein Beispiel vom Flughafen Frankfurt gibt einen Eindruck von der Auflösung der meteorologischen Abläufe (siehe Abb. 22-11).

### 2.2 TAMDAR

Im Gegensatz zu AMDAR baut das System TAMDAR zumindest im Routinebetrieb nur zu einem Teil auf den bereits auf dem Flugzeug befindlichen Sensoren auf. Die Druckparameter und eine messkammerinterne Temperatur und Feuchte sowie die gegebenenfalls auftretende Vereisung werden auf der Basis eines eigenen Sensormoduls gemessen, das gesondert in das Flugzeug eingebaut werden muss. Zudem wird das Flugzeug mit Antennen für GPS und das Satellitenkommunikationssystem IRIDIUM ausgestattet. Die für die Windberechnung erforderlichen Lagewinkel, zumindest der Steuerkurs, werden von den Datenbussen der Avionik abgezweigt. Die Druck- und Temperaturmessungen erfolgen in einer kleinen flügelstumpfähnlichen Vorrichtung an dem Modul (siehe Abb. 22-12). Alle diese Parameter müssen auf der Basis der standardmäßig auf dem Flugzeug bereits vorhandenen Drücke und Temperaturen kalibriert oder permanent gestützt werden. In dem TAMDAR-Messgehäuse befinden sich auch zwei kapazitive Feuchtemesselemente. Zudem ist an der Vorderkante des Sensors eine Mulde, in der eine Messvorrichtung für Vereisungsprozesse eingebettet ist. Das System stellt letztlich die Parameter

- Kennung,
- Position,
- statischer Druck,
- statische Temperatur,

- Wind,
- relative Luftfeuchte,
- Vereisung und
- Turbulenz (aus Vertikalbeschleunigungsdaten) zur Verfügung.

In einer Studie (MONINGER et al. 2010) konnte gezeigt werden, dass die Hinzunahme der auf Flotten regionaler Fluggesellschaften durchgeführten TAMDAR-Messungen die Fehlerquoten von numerischen Vorhersagemodellen merklich senkt.

Die Nutzungsrechte an diesen Daten sind bis auf vorübergehende Ausnahmen auf den betreffenden Wetterdienst beschränkt (Stand 2012). Die wetterdienstlichen TAMDAR-Nutzer haben keine vertraglichen oder organisatorischen Bindungen

an die mit den Instrumenten ausgestatteten Fluggesellschaften. Die gesamte Koordinationsarbeit der Sensorintegration auf den Flugzeugen liegt in der Hand des Dienstleistungsanbieters Panasonic Weather Solutions, USA.

### 3 Bestimmung und Korrektur von Messfehlern

#### 3.1 Eigenschaften des Messfehlers

Die für AMDAR und MDCRS benutzten Sensoren werden schon im Eigeninteresse der beteiligten Fluglinien gut gewartet und kalibriert, da ihre Messungen in der Triebwerkssteuerung direkt den Treibstoffbedarf beeinflussen können. Wie aber aus zahlreichen flugzeuggestützten Experimenten bekannt, können auch bei sorgfältiger Kali-

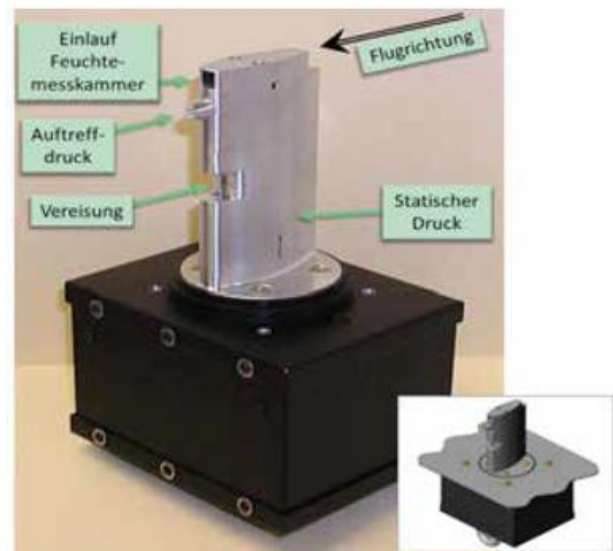


Abb. 22-12: Das TAMDAR-Sensor-Modul wird so in der Flugzeugzellenwand montiert, dass die Strömung weitestgehend parallel zur Symmetrieebene der Sonde verläuft. Sondenhöhe über dem Flansch: etwa 10 cm, (© Airdat LLC, USA).

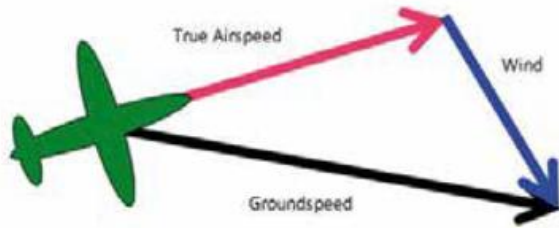


Abb. 22-13: Winddreieck: Der Vektor der Fluggeschwindigkeit ist immer parallel zur Längsachse des Flugzeugs. Über die Addition des Windvektors ergibt sich die Bewegung über Grund.

bration die gemessenen Größen signifikante Abweichungen aufweisen, zum Beispiel fast 1 K Differenz zwischen den Temperaturmessungen von zwei in enger Formation fliegenden Flugzeugen (NICHOLLS et al. 1983). Besondere Anforderungen an die Genauigkeit der Einzelmessungen gelten für die Windberechnung, da dieser Vektordifferenz zwischen den Geschwindigkeiten gegenüber dem Grund (*Groundspeed*, GS) und der Luft (*True Airspeed*, TAS) berechnet wird (siehe Abb. 22-13). Im Reiseflug beträgt die typische Fluggeschwindigkeit rund 225 m/s (800 km/h), die mittlere Windgeschwindigkeit nur rund 22 m/s (BIRNER et al. 2002). Ein relativer Fehler in TAS beziehungsweise GS von 1 % verursacht somit einen Fehler der Windgeschwindigkeit von rund 15 %.

Berechnet man die Unsicherheit der Zielgrößen Temperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung durch Fehlerfortpflanzung aus den Unsicherheiten der beteiligten Messsysteme, ergeben sich in der Regel für meteorologische Zwecke nicht akzeptable Werte. Man kann sich jedoch zunutze machen, dass sich die Unsicherheiten der einzelnen Messsysteme jeweils aus einem zufälligen und einem systematischen Fehler zusammensetzen. Letzterer wiederum setzt sich zusammen aus einer systematischen Messabweichung des Messgeräts sowie aus Abweichungen, die systematisch von verschiedenen flugdynamischen Größen (zum Beispiel Nickwinkel) abhängen. Kennt man diese Abhängigkeiten, kann man die Unsicherheit der Zielgrößen erheblich reduzieren, indem man sie als Korrektur auf den Wert der Zielgröße anwendet (siehe zum Beispiel VÖRSMANN et al. 1989).

### 3.2 Mittlere Abweichungen

Da sich systematische Fehler der Ausgangsgrößen im Wesentlichen in einer konstanten Abweichung der Zielgröße ausdrücken, kann man auch vereinfachend den systematischen Fehler der Zielgröße bestimmen. Im Falle von Windgeschwindigkeit, -richtung und Temperatur besteht die einfachste Methode darin, sie mit einer anderen Messung bzw. Referenz zu vergleichen. Dazu wurden AMDAR-Daten mit Radiosondenaufstiegen (BALLISH und KUMAR, 2008) und einem RASS (*Radio Acoustic Sounding System*) verglichen (DRÜE et al. 2010). Dabei ergab sich eine mittlere Abweichung von +0,5 K gegenüber Radiosonden (250 bis 300 hPa) und von +0,2 K gegenüber dem RASS (unterhalb 1200 m).

Das grundlegende Problem dabei ist jedoch, dass auch das Vergleichssystem systematische Fehler aufweisen kann.

Als Ausweg wurde daher jeweils ein Bezugswert als beste Schätzung des wahren Wertes – definiert, in der Regel die Vorhersage eines numerischen Wettervorhersagesystems mit der letzten vor der Messung erstellten kurzfristigen Prognose verwendet. Diese bietet sich an, da sie im Rahmen der in den Modellen wiedergegebenen Physik konsistent ist, aber im Gegensatz zu einer Analyse ohne Verwendung der zu vergleichenden Messdaten selbst zustande gekommen ist. Im Vergleich zu den 6 Stunden Vorhersagen des *US National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System* (NCEP GFS)-Modells ergab sich so eine Abweichung aller AMDAR Daten von etwa +0,2 K (BALLISH und KUMAR 2008).

Wenn man nun auf diese Weise die mittlere Messabweichung jedes Flugzeug bestimmt, könnte man die alle Messwerte dieses Flugzeuges entsprechend korrigieren. Die einzelnen Messwerte streuen jedoch stark um die Vorhersagewerte. Man benötigt viele Messwerte,  $O(10^4)$ , um die mittlere Messabweichung mit akzeptabler Unsicherheit zu bestimmen. In der Praxis stellt sich jedoch heraus, dass die Abweichungen zeitlich nicht konstant sind und je Flugzeug oft zu wenige Messwerte in einem begrenzten Zeitraum (in der Regel ein Monat) vorliegen. Es fiel jedoch auch auf, dass die Abweichungen aller Flugzeuge eines Modelltyps recht ähnliche Werte aufweisen. BALLISH und KUMAR (2008) schlagen daher vor, monatlich für jeden Flugzeugtyp die Abweichung zu bestimmen und damit die entsprechenden Messungen zu korrigieren. Sowohl das EZMW (*Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage*) als auch der DWD wenden mittlerweile Korrekturverfahren für diese Abweichungen an. Zuvor wurden die Monatsmittel der Abweichung jedoch nur zur Ermittlung auffälliger Flugzeuge benutzt. Die mittleren Abweichungen gegen das amerikanische GFS-Modell finden sich unter <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/qap/>, die Abweichungen der europäischen AMDAR-Flugzeuge werden vom E-AMDAR QEvC beim KNMI bereitgestellt unter <http://www.knmi.nl/samenw/geoss/eumetnet/E-AMDAR/QEvC/index.html>.

### 3.3 Systematische Abhängigkeiten

Wie schon gesagt, weisen die für AMDAR benutzten Messsysteme Messabweichungen auf, die von flugdynamischen Größen abhängen. So variiert die Messabweichung des Temperatursensors in seinem Schutzgehäuse mit Fluggeschwindigkeit und Anströmrichtung beziehungsweise Fluglage (Nick- und Rollwinkel). Für den Temperatursensor einer Dornier 228 wurden beispielsweise 0,05 K/° bestimmt (DRÜE 2011).

Da diese Abhängigkeiten nur im Flug bestimmt werden können, ist es bei Forschungsflugzeugen Standard, Kalibrationsflüge durchzuführen (LENSCHOW 1986, TJERNSTRÖM und FRIEHE 1991, DRÜE und HEINEMANN 2013). Dabei führt das Messflugzeug spezielle Manöver aus, durch die jeweils eine flugdynamische Größe wie zum Beispiel Geschwindigkeit oder (Flug-)Lagewinkel variiert wird. Dabei wird möglichst immer wieder das gleiche Luftvolumen durch-

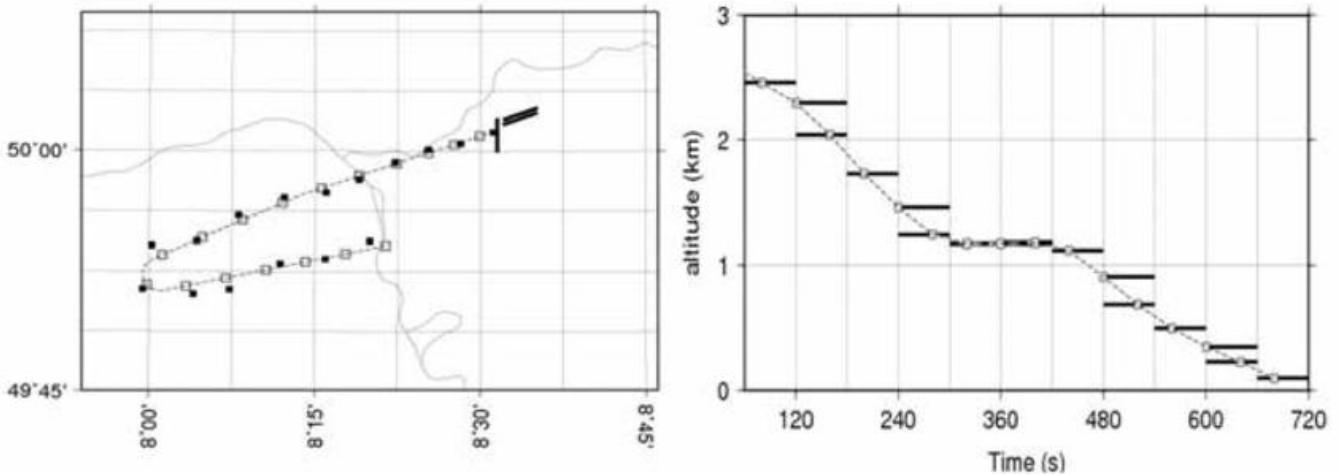


Abb. 22-14: Rekonstruktion einer Trajektorie: Anflug auf Frankfurt, links Draufsicht, recht Höhe gegen Zeit. Schwarze Punkte bzw Balken: AMDAR-Positionsmeldungen (Zeit der Einzelmessung auf 1 Minute genau, weil Sekunden bislang nicht übermittelt werden), weiße Quadrate: rekonstruierte Positionen, gestrichelte Linie: rekonstruierte Trajektorie.

fliegen. Dieses Vorgehen ist bei Verkehrsmaschinen nicht machbar, man kann jedoch die im normalen Betrieb auftretenden Variationen flugdynamischer Größen ausnutzen, in dem man sie mit Abweichungen der Zielgrößen korreliert. Dazu müssen die AMDAR-Daten flugzeugweise oder zumindest nach Typen zusammengefasst werden. Die anonymisierten Flugzeugkennungen in AMDAR einem Flugzeugtyp zuzuordnen ist nicht möglich; Wetterdienste können diese Zuordnung jedoch zum Beispiel beim technischen Koordinator für E-AMDAR erfragen. Im Vergleich der AMDAR-Vertikalprofile einzelner Flugzeugtypen mit dem Mittel aller Typen ergaben sich am Flughafen Frankfurt für die meisten Typen nahezu höhenkonstante Abweichungen von  $-0,5\text{ K}$  bis  $+0,5\text{ K}$  (DRÜE et al. 2008). Für einige Typen (B747, A319) ergab sich jedoch eine Abnahme der Abweichung mit der Höhe von etwa  $0,2\text{ K/km}$ . Besonders erstaunlich ist die systematische Differenz von rund  $1\text{ K}$  zwischen den fast baugleichen Typen A320 und A321. Die Windgeschwindigkeit weicht für die einzelnen Typen typischerweise um  $\pm 0,4\text{ m/s}$  ab, schwankt jedoch stark mit der Höhe. Betrachtet man jedoch die Abweichungen im Koordinatensystem des Flugzeugs, ergeben sich vor allem in Flugrichtung wesentlich höhenkonstantere und weniger stark streuende Abweichungen. Es liegt also nahe, den Fehler der AMDAR-Windmessungen als einen flugzeugfesten Vektor zu betrachten.

Um bekanntermaßen einflussreiche, flugdynamische Größen wie Nick- und Rollwinkel, Masse und Vertikalgeschwindigkeit (siehe zum Beispiel WILLIAMS und MARCOTTE, 2000) zu bestimmen, wurde von DRÜE (2011) ein Algorithmus zur Rekonstruktion der Flugbahn entwickelt (Abb. 22-14). Der Vergleich der Messabweichungen mit diesen Größen steht jedoch noch aus. Die Anwendung eines darauf aufbauenden Fehlermodells erlaubt voraussichtlich eine Reduktion des systematischen Temperaturfehlers um nochmals etwa  $0,25\text{ K}$ .

### 3.4 Impaktstudien

Den Mehrwert von Flugzeugmessdaten für die Wettervorhersage zu bestimmen war bisher Ziel einer über-

schaubaren Anzahl von Studien. Für erste verfügbare ACARS-Daten über den USA hatten BENJAMIN et al. (1991) schon ein geeignetes Assimilationsschema entwickelt und dargestellt, dass sich die Vorhersagen, vor allem die Topographie der  $500\text{ hPa}$ -Druckfläche deutlich verbessern, obwohl die Flugzeugdaten damals räumlich noch wenig dicht und zeitlich sehr unregelmäßig erhoben wurden. Eine neuere Auswertung am *Forecast Systems Laboratory (FSL) der NOAA* ergab eine Verbesserung des mittleren Vorhersagefehlers der Windgeschwindigkeit über den USA in  $250\text{ hPa}$  Höhe von  $0,35\text{ m/s}$ , entsprechend  $7\%$ , durch die an Wochentagen stark vermehrte Assimilation von ACARS-Daten (als US-AMDAR) (PETERSEN et al. 2004). Wegen des Flugverbotes am 11. bis 13. September 2001, wurden keine ACARS-Daten erzeugt und der Vorhersagefehler des Windes in  $250\text{ hPa}$  stieg für die Drei-Stunden-Vorhersage um  $20\%$  (PETERSEN et al. 2004).

Weitere Studien des EZMW von CARDINALI et al. (2003) und CARDINALI et al. (2004) zeigen im Mittel einen signifikanten, positiven Einfluss auf die Vorhersagegüte über West Europa und für die Maximalgeschwindigkeit des Jet-Streams. PETERSEN et al. (2004) haben durch testweises Verwerfen der Flugzeugdaten unterhalb  $350\text{ hPa}$  gezeigt, dass diese die Vorhersagen von 3 bis 48 Stunden Vorhersagezeit signifikant verbessern und der mittlere Fehler des Windes bei Verwendung der Flugzeugdaten um typischerweise  $1\text{ kt}$ , maximal bis über  $10\text{ kt}$ , abnimmt.

Die Bedeutung der von Flugzeugen gemessenen Luftfeuchte haben MATI et al. (2009) untersucht. Sie konnten dabei durchweg einen positiven, aber sehr kleinen Einfluss (etwa einstelliger Prozentbereich) feststellen.

MONINGER et al. (2010) haben gezeigt, dass TAMDAR-Daten von vergleichsweise niedrig fliegenden Propellermaschinen den mittleren Vorhersagefehler von 3-Stunden-Vorhersagen um bis zu  $0,4\text{ K}$  verringern, und die entsprechenden Fehler der Luftfeuchte um  $3\%$  und der Windgeschwindigkeit um etwa  $0,25\text{ m/s}$  senken.

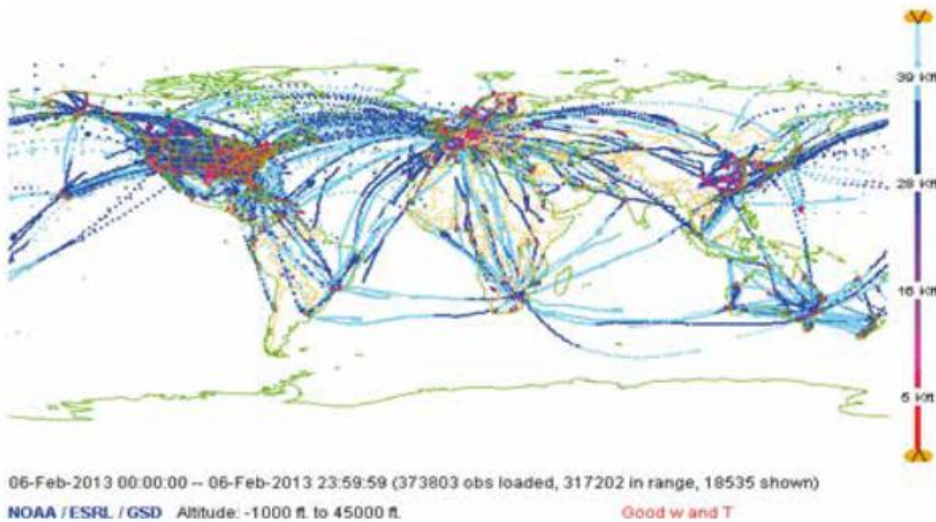


Abb. 22-15: AMDAR-Messungen weltweit, 24-Stunden-Zeitraum, 6.2.2013, alle Höhen; NOAA-Internet-Seite: <http://amdar.noaa.gov/java/>.

#### 4 Perspektiven des weltweiten Ausbaus der Luftfahrt für die meteorologische Datenerfassung einschließlich des Wasserdampfes

Die weltweite Überdeckung mit AMDAR oder ähnlichen Flugzeugmessungen gibt Abb. 22-15 wieder. Ein großer Flächenanteil dieser AMDAR-Abdeckung rekrutiert sich aus den Messungen in Reiseflughöhe. Beschränkt man die Darstellung auf den Höhenbereich von 0 bis 5 000 m (in Abb. 22-16), also nur auf die roten Streckenpunkte, dann wird erkennbar, dass in den Vertikalprofilmessungen weltweit große Bereiche leer bleiben.

Die weltweite Überdeckung mit Flugverkehr aller Art ist deutlich größer. Es wird die Aufgabe zu bewältigen sein, die AMDAR-Funktionalität inklusive wenigstens der Feuchtemessung letztendlich für alle Verkehrsflugzeuge aktivierbar zu machen. Hierfür stehen drei Wege offen.

##### 4.1 Nachträgliche Flugzeuganpassungen

Jedes Verkehrsflugzeug das heutzutage (2013) produziert wird, verlässt die Werkshallen so, dass nur die technische Basis eines Flugzeug-Boden-Kommunikationssystems und die Sensorik für Position, Flugzeugeigenbewegung, Druckhöhe, Temperatur und Wind bereit stehen. Alle weiteren für meteorologische Messfähigkeit erforderlichen Funktionselemente, ob Software oder Hardware, müssen nachträglich in ein existierendes Gesamtsystem eingepasst werden. Solche individuell flugzeugbaumuster- und kommunikationssystemgebundenen Modifikationen sind machbar.

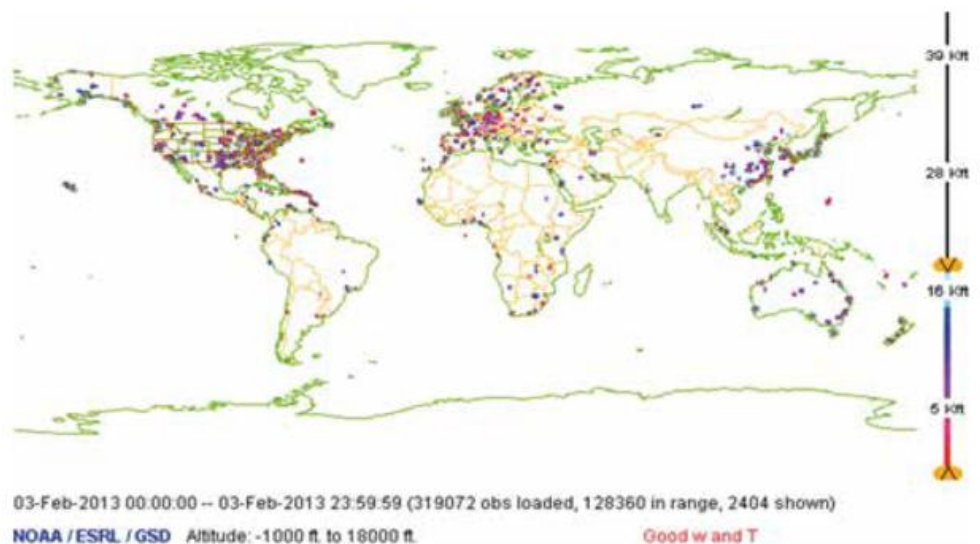


Abb. 22-16: AMDAR-Messungen weltweit, 24-Stunden-Zeitraum, 6.2.2013, 0 bis 5 000 m NOAA-Internet-Seite: <http://amdar.noaa.gov/java/>.

Aber mit jeder neuen Systemgeneration des Flugzeugs und der Avionik muss der konstruktive Teil erneut finanziert werden. Wenn auf der Flugzeugseite die Änderungskonstruktion den Rang eines Supplemental Type Certificate (STC) bekommt, so besteht nur die Möglichkeit der Übertragung auf baugleiche Muster anderer Flotten.

Diese Art der Systemlösung ist die bislang existierende. Die Investitions- und Betriebskosten von AMDAR inklusive Feuchtemessung umgelegt auf die erhaltenen Vertikalprofile laufen auf einen Stückpreis von weniger als 20 % des reinen Materialpreises eines

Radiosondenaufstieges hinaus.

##### 4.2 Werkseitige Vorbereitung von Flugzeugbaureihen

Sehr gut wäre es, wenn alle Flugzeuge oder zumindest die wegen ihres typischen Einsatzprofils geeigneten Flugzeugtypen bereits werkseitig für die meteorologischen Messaufgaben ausgestattet sind. Auf Seiten der Fluggesellschaften entstünde kein Modifikationsaufwand. Der Routinebetrieb wäre einheitlich. Der finanzielle Aufwand für eine nachhaltige Änderung der Flugzeugbaureihen für zum Beispiel AMDAR-Fähigkeit inklusive Feuchtemessung könnte mit dem Ausblick auf eine weltweit verbreitete meteorologische Nutzung auf die messbetrieblich zu aktivierenden Exemplare umgelegt werden. Abhängig davon, ab welcher Stückzahl und zu welchem Zeitpunkt der sogenannte Break-Even-Point erreicht sein soll, kann diese Lösung deutlich preiswerter und bestandskräftiger sein als die immer wieder zu erzeugenden Nachrüstungen (beschrieben im vorangegangenen Abschnitt 4.1).

Dazu kommt, dass in nicht ferner Zukunft die Flugzeuge aus Verbundwerkstoffen gebaut werden, die einen nachträglichen Einbau von Teilen in die Struktur extrem teuer werden lassen.

Auch diese Systemlösung hat aber nur zwei Nutznießer, nämlich die Wetterdienste und indirekt die Luftfahrt, weil sie, wie bei AMDAR generell, von den verbesserten Wettervorhersageleistungen profitiert.

#### 4.3 Integration von AMDAR in die Konzepte der Luftfahrtssystemtechnik kommender Generationen

Nachrichtentechnisch muss die wetterdienstliche Nutzung von Atmosphärenmessdaten der Flugzeuge zum weltweit bindenden Standard in der Luftfahrt-IT werden.

Die Integration weiterer Sensorik auf den Flugzeugen muss auf die Basis eines breiteren Interesses gestellt werden. Die insgesamt profitabelste Lösung wäre es, wenn der Nutzeffekt einer Einbeziehung zum Beispiel der Wasserdampfmessungen sich nicht nur auf die Leistungsfähigkeit der Wetterprognosen beschränken würde sondern der Betriebssicherheit und -ökonomie der Flugzeuge direkt dienen könnte, die als Trägersysteme dieser Instrumente fungieren.

So ist es denkbar, dass die relativen Feuchtwerte zusammen mit der Temperatur als eine flugsicherheitstechnisch effiziente Stützung der Vereisungswarnung dienen können. Ebenso würden die Feuchtemessungen im Interesse der Fluggesellschaften für eine ökonomischere Nutzung der energieverbrauchenden Enteisungsheizung sorgen. Bei zusätzlicher Verwendung von Partikelsensorik könnte die Feuchtemessung die die bordautonome Erkennung der ISSRs und damit die Anzeige der Kondensstreifenbildung ermöglichen, und darüber hinaus der Erkennung von Vulkanstaub dienen.

Eine derartige Systemarchitektur würde einer Bündelung der Interessen mehrerer Partner entgegenkommen: Flugsicherheit, Fluggesellschaften, Umweltschutz, Wetterdienste und letztlich auch Flugzeughersteller.

#### 5 Fazit

In den neunziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts waren es in erster Linie die Anstöße der Meteorologie, die Fluggesellschaften dahin zu bringen, ihre Flotten in den Dienst der Atmosphärenmessungen zu stellen. Die Aussicht auf eine merkliche Leistungssteigerung in der Wettervorhersage war und ist eine Motivation, an den Nachrichtensystemen der Flugzeuge Änderungen in Kauf zu nehmen. Merkwürdiger gestaltet sich diese Motivationsarbeit, wenn zu den bislang luftfahrtstandardmäßigen Bordinstrumenten weitere hinzukommen sollen. Andererseits erfordert die permanente Weiterentwicklung der numerischen Atmosphärenvorhersagemodelle einen Ausbau des Messdatenangebotes in immer höherer Auflö-

sung in Raum und Zeit. Der weltweite Flugverkehr bildet dafür eine wertvolle Plattform. Es gibt die Chance, die Interessen aller Beteiligten wie Wetterdienste, Fluggesellschaften, Flugsicherheit, Umweltschutz und nicht zuletzt Flugzeughersteller einerseits aus flugsicherheitstechnischen aber vielmehr noch aus wirtschaftlichen Gründen dergestalt bündeln zu können, dass letztendlich alle Verkehrsflugzeuge ohne gesonderte Nachrüstungen zu den Atmosphärenmessungen standardmäßig beitragen.

#### Literatur

- Aircraft Observations. WMO No. 8, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (CIMO Guide), Part II, Chapter 3.
- BALLISH, B. A., KUMAR, V. K., 2008: Systematic Differences in Aircraft and Radiosonde Temperatures. *Bulletin of the American Meteorological Society* **89**, 1689-1707, doi: 10.1175/2008BAMS2332.1.
- BENJAMIN, S. G., BREWSTER, K. A., BRÜMMER, R., JEWETT, B. F., SCHLATTER, T. W.; SMITH, T. L., STAMUS, P. A., 1991: An Isentropic Three-Hourly Data Assimilation System Using ACARS Aircraft Observations. *Monthly Weather Review* **119**, 888-906, doi: 10.1175/1520-0493(1991)119<0888:AITHDA>2.0.CO;2.
- BIRNER, T., DÖRNBRACK, A., SCHUMANN, U., 2002: How sharp is the tropopause at midlatitudes? *Geophys. Res. Lett.* **29**(14), 1700, doi: 10.1029/2002GL015142.
- BÖGEL, W., BAUMANN, R., 1991: Test and Calibration of the DLR Falcon Wind Measuring System by Maneuvers. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **8**, 5-18.
- CARDINALI, C., ISAKSEN, L., ANDERSSON, E., 2003: Use and Impact of Automated Aircraft Data in a Global 4DVAR Data Assimilation System. *Monthly Weather Review* **131**, 1865-1877, doi: 10.1175//2569.1.
- CARDINALI, C., RUKHOVETS, L., TENENBAUM, J., 2004: Jet Stream Analysis and Forecast Errors Using GADS Aircraft Observations in the DAO, ECMWF, and NCEP Models. *Monthly Weather Review* **132**, 764-779, doi: 10.1175/1520-0493(2004)132<0764:JSAAFE>2.0.CO;2.
- DE HAAN, S., 2009: Quality assessment of high resolution wind and temperature observations from Mode S. *KNMI Scientific report*, WR 2009-07.
- DE HAAN, S., STOFFELEN, A., 2010: Assimilation of High Resolution Mode-S Wind and Temperature Observations in a Limited Area NWP-model. *KNMI Scientific Report* 2010-03.
- DRÜE, C., FREY, W., HOFF, A., HAUF, T., 2008: Aircraft type-specific errors in AMDAR weather reports from commercial aircraft. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **134**, 229-239, doi: 10.1002/qj.205.
- DRÜE, C., HAUF, T., HOFF, A., 2010: Comparison of Boundary-Layer Profiles and Layer Detection by AMDAR and WTR/RASS at Frankfurt Airport. *Boundary-Layer Meteorology* **135**, 407-432.
- DRÜE, C., 2011: Reconstruction of Aircraft Trajectories from AMDAR Weather Reports. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **28**, 921-932, doi: 10.1175/2011JTECHA1499.1.

- DRÜE, C., HEINEMANN, G., 2013: A practical in-flight calibration scheme for aircraft turbulence sensors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, in review.
- HOFF, A., SONNABEND, H.-R., DRÜE, C., 2013: Messphysik und Datenverarbeitung der Verkehrsflugzeuge als meteorologische Sensorträger. *Berichte des DWD* **242**.
- KLEINERT, T., 2012: EUCOS Annual Quality Monitoring Report 2011. *Deutscher Wetterdienst*, 18 u. 31.
- LENSCHOW, D. H., 1986: Probing the Atmospheric Boundary Layer. *American Meteorological Society*, Boston.
- MATI, I., SARRAZIN, R., ZAITSEVA, Y., VERNER, G., 2009: Monitoring and Assimilation Impact Study of Moisture Data from Aircraft at the Canadian Meteorological Center. 3th Conference on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), January 10 bis 16, Phoenix, AZ, USA.
- MAY, R. D., WEBSTER, C.R., 1993: Data Processing and Calibration for Tunable Diode Laser Harmonic Absorption Spectrometers. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **49**, 335–347.
- MONINGER, W. R., BENJAMIN, S. G., JAMISON, B. A., SCHLATTER, T. W., SMITH, T. L., SZOKE, E. J., 2010: Evaluation of Regional Aircraft Observations Using TAMDAR. *Weather and Forecasting* **25**, 627–645, doi: 10.1175/2009WAF2222321.1.
- NICHOLLS, S., SHAW, W., HAUF, T., 1983: An Intercomparison of Aircraft Turbulence Measurements Made During JASIN. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **22**, 1637–1648, doi: 10.1175/1520-0450(1983)0221637:AIOATM>2.0.CO;2.
- PAINTING, D. J., 2003: AMDAR reference manual. WMO-No. 958, pp. [Available online at [http://amdar.wmo.int/Publications/AMDAR\\_Reference\\_Manual\\_2003.pdf](http://amdar.wmo.int/Publications/AMDAR_Reference_Manual_2003.pdf)].
- PETERSEN, R.A., MANIKIN, G., KEYSER, D., 2004: Summary of Impact Tests of Automated Wind / Temperature Reports from Commercial Aircraft. *World Meteorological Organization*, electronic resource: [http://www.wmo.int/amdar/Resources/AMDAR\\_Impact\\_Papers\\_2004/Summary%2520of%2520Impact%2520Tests%2520of%2520Automated%2520Wind.x.doc](http://www.wmo.int/amdar/Resources/AMDAR_Impact_Papers_2004/Summary%2520of%2520Impact%2520Tests%2520of%2520Automated%2520Wind.x.doc) (retrieved 2013-02-03).
- SCHUMANN, U., 1996: On Conditions for Contrail Formation from Aircraft Exhausts. *Meteorol. Z.* **5**, 4–23.
- TJERNSTRÖM, M., FRIEHE, C. A., 1991: Analysis of a Radome Air-Motion System on a Twin-Jet Aircraft for Boundary-Layer Research. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **8**, 19–40, doi: 10.1175/1520-0426(1991)0080019:AOARAM>2.0.CO;2.
- VÖRSMANN, P., FRIEDERICI, B., HOFF, A., 1989: METEOPOD - ein flugzeuggestütztes Turbulenzmesssystem. *Promet* **19**, 57 bis 64.
- WENDISCH, M., BRENGUIER, J. L., 2013: Airborne Measurements for Environmental Research, Methods and Instruments. Wiley Series in Atmospheric Physics and Remote Sensing, *Wiley-VCH Verlag*.
- WILLIAMS, A., MARCOTTE, D., 2000: Wind Measurements on a Maneuvering Twin-Engine Turboprop Aircraft Accounting for Flow Distortion. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **17**, 795–810, doi: 10.1175/1520-0426(2000)0170795:WMOAMT>2.0.CO;2.

## Glossar für die beiden Hefte zur Flugmeteorologie

Abkürzung/ Objekt	Ausgeschriebener Begriff	Erläuterung *
4DWxC	<i>Four dimensional Weather Cube</i>	Meteorologischer Datenserver mit vierdimensionalen Daten, Verbindungsstelle zwischen Wetterdiensten und ATM-Nutzern
4D Flugtrajektorie	Vierdimensionale Flugtrajektorie	Flugzeugtrajektorie als Funktion der Zeit
ACARS	<i>Aircraft Communications Addressing and Reporting System</i>	Ein von der Firma ARINC in den 1970er Jahren entwickeltes digitales Datenfunksystem zur Übermittlung von Nachrichten zwischen Verkehrsflugzeugen und Bodenstationen
ACC	<i>Area Control Center</i>	Bezirkskontrollstelle
ADF	<i>Aircraft De-Icing/Anti-Icing Fluid</i>	Wasser- und Glykolegemisch zur Enteisung von Flugzeugen, je nach Viskosität zum Enteisen oder zum Schutz vor Vereisung
ADS-B/ ADS-C	<i>Automatic Dependent Surveillance</i>	Automatische bordabhängige Überwachung; Flugdaten wie Position, Flugnummer, Flugzeugtyp, Zeitsignal, Geschwindigkeit, Flughöhe und geplante Flugrichtung und auch meteorologische Daten werden im Fall B kontinuierlich und im Fall C auf Anforderung abgestrahlt
ADWICE	<i>Advanced Diagnosis and Warning system for aircraft ICing Enviroments</i>	Expertensystem zur Erkennung und Vorhersage (maximal 72 Stunden) von Flugzeugvereisung, die durch unterkühlte ( $T < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) flüssige Wolken- und Niederschlagströpfchen hervorgerufen wird, operationelles DWD-Produkt
AFTN	<i>Aeronautical Fixed Telecommunication Network</i>	Weltweites fest installiertes Flugsicherungsfernmeldenetz
AIM AIS	<i>Aeronautical Information Management Aeronautical Information Service</i>	Luftfahrtinformationsdienst, siehe auch <a href="http://www.icao.int/safety/information-management/Pages/default.aspx">http://www.icao.int/safety/information-management/Pages/default.aspx</a>
AGeoBW	Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr	Frühere Bezeichnung, heute: ZGeoBw
AIP	<i>Aeronautical Information Publication</i>	Luftfahrthandbuch
AIREP	<i>Air Report</i>	Pilotenbericht über weniger signifikante, aber ebenfalls bedeutende Wettererscheinungen
ALADIN	<i>Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational</i>	Vom französischen Wetterdienst Meteo-France initiiertes internationales Konsortium für die Entwicklung eines NWV-Modellsystems
AMAN	<i>Arrival Manager</i>	Unterstützungssystem für Fluglotsen bei der Anflugstaffelung
AMDAR	<i>Aircraft Meteorological Data Relay</i>	Zeitnahe Übertragung flugzeugbasierter meteorologischer Messdaten, wie Temperatur, Druck und teilweise auch Feuchte, an Wetterdienste; siehe auch <a href="http://www.wmo.int/pages/prog/www/GOS/ABO/AMDAR/">http://www.wmo.int/pages/prog/www/GOS/ABO/AMDAR/</a>
AMSL	<i>Above Mean Sea Level</i>	Höhe über Meeressniveau
ANC	<i>Auto-Nowcast System</i>	NCAR-Auto-Nowcast-System, siehe auch <a href="http://www.nws.noaa.gov/mdl/autonowcaster/docs/ANC_V3.3.pdf">http://www.nws.noaa.gov/mdl/autonowcaster/docs/ANC_V3.3.pdf</a> und <a href="http://www.ral.ucar.edu/projects/nowcast/">http://www.ral.ucar.edu/projects/nowcast/</a>
APP	<i>Approach Control</i>	Anflugkontrolle
ARINC	<i>Aeronautical Radio Incorporated</i>	Betreiber weltweiter Kommunikations- und Datennetzsysteme für Luftfahrt, Entwickler und Koordinator für Kommunikationsnormen
ARS	<i>Air Report Special</i>	Pilotenbericht über signifikante gefährliche Wettererscheinungen

Abkürzung/ Objekt	Ausgeschriebener Begriff	Erläuterung *
ASDAR	<i>Aircraft to Satellite Data Relay</i>	Kommunikationssystem mit Satellitenverbindung: die auf den Datenbussen des Flugzeugs verfügbaren meteorologischen Daten werden darüber an die Wetterdienste weitergeleitet
ASDUV	Automatisches System zur Datenerfassung und Verbreitung	System zum selbsttätigen Erfassen, Verarbeiten, Überprüfen, Darstellen und Verbreiten meteorologischer Messwerte und Beobachtungen an Verkehrsflughäfen zur Sicherung des Flugbetriebes entsprechend den Anforderungen der ICAO
ASHTAM	<i>Ash report to airman</i>	Spezialform eines NOTAMs, das vor vulkanischen Aktivitäten, Vulkanausbrüchen und vulkanischen Aschewolken warnt, sofern sie von Bedeutung für die Luftfahrt sind
ATFCM	<i>Air Traffic Flow and Capacity Management</i>	Siehe <a href="http://www.eurocontrol.int/articles/air-traffic-flow-and-capacity-management">http://www.eurocontrol.int/articles/air-traffic-flow-and-capacity-management</a>
ATIS	<i>Automatic Terminal Information Service</i>	Automatische Informationsdurchsage zum Wetter und zu den aktiven Start- und Landebahnen in einer Endlosschleife, Empfang auf einer bestimmten Funkfrequenz auf dem Flughafengelände und im Anflugbereich, Aktualisierung 30 Minuten nach letztem METAR
ATM	<i>Air Traffic Management</i>	
ATTAS	<i>Advanced Technologies Testing Aircraft System</i>	Flugversuchsträger ATTAS, ehemaliges Forschungsflugzeug des DLR
Avionik/ Avionics	Aviatic-Elektronik/ <i>Aviation Electronics</i>	Elektronische Navigations-, Steuerungs- und Nachrichtensystemtechnik auf Flugzeugen
AVOSS	<i>Aircraft VOrtex Spacing System</i>	Prognosesystem der NASA zur wetterabhängigen dynamischen Wirbelschleppenseparation bei Landungen
BAF	Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung	
BFU	Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung	Siehe <a href="http://www.bfu-web.de/DE/Home/homepage_node.html">http://www.bfu-web.de/DE/Home/homepage_node.html</a>
Birdstrike	Vogelschlag	Zusammenstoß von Vögeln mit Luftfahrzeugen
BIRDTAM	<i>BIRD-warning To AirMen</i>	Vogelschlagwarnung für Luftfahrer
BiStRiFo	<i>BirdStrike Risk Forecast</i>	Verfahren des AGeoBw zur Vorhersage des Vogelschlagrisikos
BIV	Bildschirmverstärkung	Nachtflüge mit Bildverstärkerbrillen werden häufig von Bundeswehr und Polizei durchgeführt.
BMV BMVBW BMVBS BMVI	Bundesministerium für Verkehr Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	1949 - 1998 1998 - 2005 2005 - 2013 ab 2013
CARA	<i>Collaborative Arrival Regulation Avoidance</i>	<a href="http://www.eurocontrol.int/news/atfcm-cherry-picking-vienna-concrete-benefit-aircraft-operators">http://www.eurocontrol.int/news/atfcm-cherry-picking-vienna-concrete-benefit-aircraft-operators</a>
CARIBIC	<i>Civil Aircraft for the Regular Investigation of the atmosphere Based on an Instrument Container</i>	Instrumentencontainer zur Atmosphärenforschung in einem A340-600 Passagierflugzeug der Lufthansa
CAS	<i>Calibrated air speed</i>	Um statische Einbau- oder Instrumentenfehler berichtigte Fluggeschwindigkeit
CAT	<i>Clear Air Turbulence</i>	Turbulenz in wolkenfreien Gebieten

Abkürzung/ Objekt	Ausgeschriebener Begriff	Erläuterung *
CAT	<i>Category</i>	Betriebsstufe (I-III) des ILS, bestimmt durch die Sichtbedingungen
Cb-TRAM	<i>Cumulonimbus Tracking and Monitoring</i>	Am DLR entwickeltes Verfahren zur Identifikation, Verfolgung und 1h-Vorhersage von Gewitterzellen (Zinner et al., 2008, 2013)
CDM	<i>Collaborative Decision Making</i>	Gemeinschaftlicher Entscheidungsprozess, <a href="http://www.euro-cdm.org/">http://www.euro-cdm.org/</a>
CEIL	<i>Ceiling</i>	Höhe der tiefsten Wolkenuntergrenze mit Bedeckungsgrad größer 3/8 (unterhalb 6000 m) in FT über Grund
CFIT	<i>Controlled Flight into Terrain</i>	Gesteuerter, aber ungewollter Flug in den Boden, <a href="http://www.skybrary.aero/index.php/Controlled_Flight_Into_Terrain">http://www.skybrary.aero/index.php/Controlled_Flight_Into_Terrain</a>
CFMU	<i>Central Flow Management Unit</i>	ATM&ATC-Steuerungseinheit von EUROCONTROL, <a href="http://www.euro-control.int/network-operations">http://www.euro-control.int/network-operations</a>
CIK	<i>Subgrid scale circulation kinetic energy</i>	SGS kinetische Zirkulationsenergie
CIP	<i>Current Icing Product</i>	Aktuelle Informationen zur Vereisungswahrscheinlichkeit des amerikanischen Warnsystems für Flugzeugvereisung, <a href="http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JAM2246.1">http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JAM2246.1</a>
CIT	<i>Convective induced turbulence</i>	Durch Konvektion in oder über einer Wolke oder einer Konvektionszelle hervorgerufene Turbulenz
COBIBE	Computerunterstütztes BIologisches BERatungssystem	Zur automatischen Erstellung von Vogelschlagwarnungen aus Vogelzugbeobachtungen
COSMO COSMO-DE COMOE-EU COSMO-ART	<i>Consortium for small Scale Modelling</i>	Zusammenschluss verschiedener Wetterdienste unter Führung des DWD zur Erstellung und Betrieb eines Wettervorhersagemodells mit hoher räumlicher Auflösung, für Deutschland (COSMO-DE, früher LMK) Maschenweite etwa 2,8 km, für Europa (COSMO-EU) Maschenweite $0,0625^\circ \approx 7$ km, <a href="http://www.cosmo-model.org/content/tasks/operational/dwd/default_eu.htm">http://www.cosmo-model.org/content/tasks/operational/dwd/default_eu.htm</a> ; COSMO-Modellerweiterung um Aerosole und relevante Prozesse (COSMO-Art), siehe auch <a href="http://www.imk-tro.kit.edu/3509.php">www.imk-tro.kit.edu/3509.php</a>
COSMO-MUC	Von den COSMO-DE abgeleitetes Modell für die Umgebung des Flughafens München (MUC)	Mit stündlicher Aktualisierungsrate und Assimilation lokaler Beobachtungsdaten
CP	<i>Common Project</i>	Gemeinschaftsprojekte in der SESAR-Umsetzungsphase
CREDOS	<i>Crosswind-Reduced Separations for Departure Operations</i>	EU-Forschungsprojekt (2006-2009) zur Reduzierung der Wirbelschleppenstaffelung bei Starts unter geeigneten Querwindbedingungen
CSS-Wx	<i>Common Support Services-Weather</i>	Entwicklungsprojekt für Wetterprodukte in NextGen
CTR	<i>Control Zone</i>	Kontrollzone
CWP	<i>Controller Working Position</i>	Lotsenarbeitsplatz, siehe <a href="http://www.skybrary.aero/index.php/Controller_Position_Design">http://www.skybrary.aero/index.php/Controller_Position_Design</a>
DERA	<i>Defence Evaluation and Research Agency</i>	Bis 2001 größte wissenschaftliche und technologische Organisation des Vereinigten Königreichs; danach Aufspaltung in einen kommerziellen Teil (PDERA, „privatised“ DERA) und einen öffentlichen Teil QinetiQ
DEVG	<i>Derived Equivalent Vertical Gust</i>	Maximale Geschwindigkeit einer vertikalen Böe innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls, die aus im Flugzeug gemessenen Schwankungen der Schwerebeschleunigung (Accelerometer-Messungen) abgeleitet und als Turbulenzmaß verwendet wird.
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH	<a href="http://www.dfs.de">http://www.dfs.de</a>

Abkürzung/ Objekt	Ausgeschriebener Begriff	Erläuterung *
DIA	<i>Diagnostic Icing Algorithm</i>	Diagnosealgorithmus des Vereisungswarnsystems ADWICE zum Now-casting von Vereisungsräumen über Europa mit Ausgabeprodukt DIP ( <i>diagnostic icing product</i> )
DIVMET	<i>Divert Meteorology</i>	An der Leibniz-Universität Hannover entwickelter Gewitterausweichalgorithmus für Flugverkehrssimulationen
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt, Energie und Verkehr
DMRZ	Deutsches Meteorologisches Rechenzentrum	am DWD
DP	<i>De-Icing Pad</i>	Auf Flughäfen vorgesehene Flächen für die Enteisung von Flugzeugen, meist in Startbahnnahe
DSNA	<i>Direction des Services de la navigation aérienne</i>	Französische Flugsicherung
DWD	Deutscher Wetterdienst	Der Deutsche Wetterdienst ist eine öffentliche Institution und eine teilrechtsfähige Anstalt des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Er ist für die Erfüllung der meteorologischen Erfordernisse aller Wirtschafts- und Gesellschaftsbereiche in Deutschland zuständig und repräsentiert die Regierung in innerstaatlichen und internationalen Organisationen, wie z.B. der Weltorganisation für Meteorologie (WMO).
E-ADAS	<i>E-AMDAR Data Acquisition System</i>	EUMETNET-AMDAR Datenerfassungssystem, zentrale Sammelstelle der E-AMDAR-Messdaten zur Einspeisung in das GTS
E-ADOS	<i>E-AMDAR Data Optimisation System</i>	EUMETNET-AMDAR Steuerungsprogramm zur optimalen Messaktivierung von Flugzeugen in Zeit und Raum
E-AMDAR	<i>EUMETNET-AMDAR</i>	Das von mehreren EUMETNET-Partnern arbeitsteilig betriebene Projekt AMDAR
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>	Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (deutsch: EZMWF) mit Sitz in Reading (GB)
EDDF		ICAO-Code Flughafen Frankfurt
EDP	<i>Eddy Dissipation Parameter</i>	$:=(\text{EDR})^{1/3}$
EDR	<i>Eddy Dissipation Rate</i>	Wirbel Dissipationsrate, Umwandlungsrate kinetischer Wirbelenergie in Wärme.
ELD	Ellrod-Index	Von G.P. Ellrod entwickelter Index für die Stärke von CAT, der sich als Produkt von Deformation und vertikaler Scherung des Horizontalwindfeldes darstellt und aus Modellausgabefeldern berechnet werden kann. Einheit $1/s^2$ .
FAB	<i>Functional Airspace Block</i>	Funktionales Luftraumstrukturelement, <a href="http://www.eurocontrol.int/dossiers/fabs">http://www.eurocontrol.int/dossiers/fabs</a>
FABCE	<i>Functional Airspace Block Central Europe</i>	Funktionaler Luftraumblock Zentraleuropa mit den Staaten Österreich, Slowenien, Slowakei, Tschechien, Kroatien, Ungarn, Bosnien & Herzegowina
FABEC	<i>Functional Airspace Block Europe Central</i>	Funktionaler Luftraumblock „Europa zentral“ mit den Staaten Deutschland, Frankreich, Niederlande, Belgien, Luxemburg, Schweiz
FIC	<i>Flight Information Center</i>	Fluginformationszentrum
FIP	<i>Forecast Icing Product</i>	Vorhergesagte Vereisungswahrscheinlichkeit des amerikanischen Warnsystems für Flugzeugvereisung, <a href="http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JAM2246.1">http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JAM2246.1</a>

Abkürzung/ Objekt	Ausgeschriebener Begriff	Erläuterung *
FIR	<i>Flight Information Region</i>	Fluginformationsgebiet. Die FIR ist ein definierter Luftraum, in dem Fluginformations- und Alarmdienste angeboten werden. Jeder Teil der Atmosphäre ist genau einer FIR zugeordnet. Die verantwortlichen Fluglotsen in den <i>Area Control Centren</i> führen die Verkehrskontrolle und Information der Piloten durch und weisen ihnen geeignete Routen und Höhen für den Reiseflug sowie An- und Abflüge zu. Die Übergabe der Flugzeuge an die nächste FIR ist durch eindeutige Verfahren geregelt. Der Kontrollbereich erstreckt sich vom Boden bis zur Flugfläche 245 (24500 Fuß). Darüber befinden sich die UIR.
FL	<i>Flight Level</i>	Flugniveau, Flugfläche (in hundert Fuß-Einheiten, zum Beispiel FL 100 = 10 000 FT, über der Höhe des Normaldruckes von 1013,25 hPa)
FLEXPART		Lagrangesches Partikel Dispersions Modell des <i>Norwegian Institute for Air Research</i> (NILU)
FLYSAFE	<i>Airborne Integrated Systems for Safety Improvement, Flight Hazard Protection and All Weather Operations</i>	EU-Projekt (2005-2009) zur Entwicklung neuer integrierter bordeigener Informations-Systeme (NGISS: <i>Next Generation Integrated Surveillance Systems</i> ) für die Erkennung und Vermeidung von Gefahren durch schlechtes Wetter, Terrain und Verkehr, <a href="http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/making_air_travel_safer_en.htm">http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/making_air_travel_safer_en.htm</a>
FMP	<i>Flow Management Position</i>	<a href="http://www.eurocontrol.int/articles/what-air-traffic-management">http://www.eurocontrol.int/articles/what-air-traffic-management</a>
FMS	<i>Flight Management System</i>	Bordeigene elektronische Hilfsmittel für Flugsteuerung und Navigation
FMZ aut	Automatische Fernmeldezentrale	des AGeoBw
Fraport AG		Betreibergesellschaft des Flughafens Frankfurt
GAMET	<i>General Aviation METreport</i>	FIR-spezifische Gebietswettervorhersage für die Luftfahrt in niedrigen Höhen als Ergänzungen zum GAFOR, <a href="http://www.notam.de/fileadmin/Files/Wetter/gametinfo.pdf">http://www.notam.de/fileadmin/Files/Wetter/gametinfo.pdf</a> (für Deutschland)
GAFOR	<i>General Aviation Forecast</i>	Flugwettervorhersage für die Allgemeine Luftfahrt in Gebieten (Deutschland) oder entlang von Flugstrecken (Österreich und Schweiz) mit Einteilung in 4 bis 5 Sichtflugstufen.
GeoMIA	Geophysikalische Messwerteerfassungs- und Informationsübertragungsanlage der Bundeswehr	
GIS	Geographisches Informationssystem	
GND	<i>Ground control</i>	Bodenkontrolle
GRIB-Format	<i>GRIdded Binary</i>	Standardisiertes, komprimiertes binäres Datenformat für meteorologische Daten
GS	<i>Ground Speed</i>	Fluggeschwindigkeit relativ zum Boden
GTG	<i>Graphic Turbulence Guidance</i>	NWV-gestützte und statistisch aufbereitete Ableitung eines Turbulenzmaßes und deren graphische Darstellung (NCAR/Boulder)
GTS	<i>Global Telecommunication System</i>	Globales Telekommunikationssystem der WMO
HAIC HIWC	<i>High Altitude Ice Crystals High Ice Water Content</i>	International angelegtes Projekt zur Untersuchung hoher Eiskristallkonzentrationen oder hohen Eiswassergehalts als Ursache von Triebwerks- und Sensorvereisung <a href="http://www.haic.eu/">http://www.haic.eu/</a> , <a href="http://www.ral.ucar.edu/projects/hivc/">http://www.ral.ucar.edu/projects/hivc/</a>

Abkürzung/ Objekt	Ausgeschriebener Begriff	Erläuterung *
HALO	<i>High Altitude and Long Range Research Aircraft</i>	Gulfstream G 550-Forschungsflugzeug des DLR für Höhen bis 15 km
HKIA	<i>Hong Kong International Airport</i>	
HOT	<i>Hold Over Time</i>	Vorhaltezeit. Zeit, in der das verwendete Anti-Icing Fluid vor einer Vereisung der Flugzeugoberfläche schützt
IAGOS	<i>In-Service Aircraft for a Global Observing System</i>	Geplante Infrastruktur für langfristige globale Beobachtungen von Luftchemie, Aerosol- und Wolkenpartikeln auf der Basis einer Flotte von zunächst 10 bis 20 Langstreckenflugzeugen international operierender Fluggesellschaften
IAS	<i>Indicated Air Speed</i>	Mit dem Staurohr gemessene Fluggeschwindigkeit
IATA	<i>International Air Transport Association</i>	Dachverband der Fluggesellschaften
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>	Internationale Zivilluftfahrtorganisation, Sonderorganisation der Vereinten Nationen mit Sitz in Montreal, Kanada für die Erarbeitung und Weiterentwicklung einheitlicher Regelungen zur Sicherheit, Regelmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit des internationalen Luftverkehrs, <a href="http://www.icao.int">http://www.icao.int</a>
ICON	<i>ICOsahedral Nonhydrostatic</i>	Nicht-hydrostatisches Globalmodell des DWD, dessen Rechengitterelemente Ikosaeder-Form besitzen, und das sowohl für die NWV als auch für Klimasimulationen benutzt werden soll. Geplantes Nachfolgemodell für COSMO.
IFR	<i>Instrument Flight Rules</i>	Instrumentenflug(regeln); Steuern von Luftfahrzeugen, bei dem die Fluglage ohne Bezug auf äußere Anhaltspunkte ausschließlich mit Hilfe von Instrumenten an Bord und durch Unterstützung von Fluglotsen am Boden kontrolliert wird; im Gegensatz dazu steht der Sichtflug
ILS	<i>Instrument Landing System</i>	Instrumentenlandesystem
IMC	<i>Instrument Meteorological Conditions</i>	Instrumentenflugbedingungen
INTOL	En-Route-Wegpunkt im brasilianischen Luftraum über dem Südatlantik	Koordinaten: 1° 21' 39S, 32° 49' 53W
IntranetBW	Intranet der Bundeswehr	
IPA	Institut für Physik der Atmosphäre	Institut des DLR in Oberpfaffenhofen
IRIDIUM	Der Name des Systems ist das chemische Element im Periodensystem mit der Ordnungszahl 77	System von (ursprünglich 77) niedrig fliegenden Satelliten für die direkte Kommunikation von mobilen Einheiten
ISA	Internationale Standardatmosphäre	
ISAF	<i>International Security Assistance Force</i>	Internationaler militärischer Verband mit UN-Mandat in Afghanistan
ISSR	<i>Ice-Supersaturated Regions</i>	Regionen mit Wasserdampfübersättigung bezogen auf Eis
ITWS	<i>Integrated Terminal Weather System</i>	An 32 USA-Flughäfen installiertes System, das Informationen vorhandener Beobachtungssysteme integriert und daraus spezifische Wärmeldungen ableitet, einschließlich eines 1h-Nowcastings; <a href="http://www.faa.gov/air_traffic/technology/itws/">www.faa.gov/air_traffic/technology/itws/</a>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>	Forschungseinrichtung des <i>California Institute of Technology</i> Caltech, Schwerpunkt Bau und Steuerung von Satelliten für die NASA

Abkürzung/ Objekt	Ausgeschriebener Begriff	Erläuterung *
LBZ	Luftfahrtberatungszentrale	Regional gegliederte Einrichtung des DWD an derzeit fünf Standorten für Flugwettervorhersagen und Beratung
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>	Grobstruktursimulation der Turbulenz auf Basis der Navier-Stokes-Gleichungen mit Auflösung der größten Wirbel und Parametrisierung der kleineren
LIDAR	<i>Light detection and ranging</i>	Dem Radar verwandte Methode zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung sowie zur Fernmessung atmosphärischer Parameter mit Laserlicht
LINET	<i>High-precision lightning detection network</i>	Blitzortungssystem der Firma nowcast, <a href="https://www.nowcast.de">https://www.nowcast.de</a>
LLSWC	<i>Low Level Significant Weather Chart</i>	Vorhersagekarte für den Piloten zur Flugvorbereitung, beschreibt signifikantes Flugwetter wie Turbulenzen, Vereisung, Gewitter etc. bis in eine Höhe von 24500 FT
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität München	
LuftVO	Luftverkehrsordnung	Verpflichtet gemäß §3a jeden Piloten vor Flugantritt Wetterinformationen einzuholen
LVP	<i>Low Visibility Procedures</i>	An- und Abflugverfahren bei niedriger Sicht; <a href="http://www.skybrary.aero/index.php/Low_Visibility_Procedures">http://www.skybrary.aero/index.php/Low_Visibility_Procedures</a>
MDCRS	<i>Meteorological Data Collection and Reporting Service</i>	Zeitnahe Übertragung flugzeugbasierter meteorologischer Messdaten über ARINC an NOAA
MET		International übliche Abkürzung für „Meteorologie“, „meteorologisch“ oder „flugmeteorologische Information“
METAR	<i>Meteorological Aviation Routine Weather Report, auch: Aerodrome routine meteorological report, METeorological Aerodrome Report, METeorological Terminal Aerodrome Report, Message d'observation météo-rogologique régulière pour l'aviation</i>	Standardisierte Wettermeldung von Flughäfen in Kurzform
METEO FRANCE		Französischer Wetterdienst
METEOGRAMM		Grafische Darstellung der Wetterentwicklung für einen regionalen Bereich
METEOSAT		Europäisches Wettersatellitenprogramm mit derzeit operationell METEOSAT-7,-8,-9,-10
METEOSAT SEVIRI	<i>Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager</i>	Radiometer auf METEOSAT-8,-9,-10, maximale Auflösung 1x1 km, <a href="http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/index.html">http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/index.html</a>
Met Office	<i>UK Met Office</i>	Britischer Wetterdienst
MetUM	<i>Met Office Unified Model</i>	NWV-Modell des englischen Wetterdienstes
MM5 (Model)	<i>Mesoscale Meteorology Model 5</i>	Mesoskaliges Simulationsmodell am NCAR; <a href="http://www.mmm.ucar.edu/mm5/">http://www.mmm.ucar.edu/mm5/</a>
MODE-S		Überwachungsradar basiertes individuelles selektives („S“) Adressierungs- und Erkennungsverfahren von Flugzeugen
MOR	<i>Meteorological Optical Range</i>	Meteorologische Sichtweite, definiert durch die Reduktion des Lichtstroms einer weißglühenden Lampe mit einer Farbtemperatur von 2700 K auf 5 % seines ursprünglichen Wertes.

Abkürzung/ Objekt	Ausgeschriebener Begriff	Erläuterung *
MOS	<i>Model Output Statistics</i>	Verfahren zur Korrektur von Modellvorhersagen oder zur Ableitung nicht explizit vom Modell vorhergesagter Parameter auf der Basis statistischer Beziehungen zwischen Modellprognosen und Beobachtungen; meist in der Form von multilinenen Regressionsgleichungen mit geeigneten Modellvariablen als Prädiktoren
MOZAIC	<i>Measurements of OZone, water vapour, carbon monoxide and nitrogen oxides by in-service Airbus airCraft</i>	Luftchemisches Messprogramm an Bord mehrerer A340-Airbus Verkehrsflugzeuge
MSL	<i>Mean Sea Level</i>	Mittleres Meeresspiegelniveau
MUAC	<i>Maastricht Upper Area Control Centre</i>	Kontrollcenter des oberen Luftraums in Maastricht, <a href="http://www.eurocontrol.int/maastricht-uac">http://www.eurocontrol.int/maastricht-uac</a>
MUC	Flughafen München	<a href="http://www.munich-airport.de/de/consumer/index.jsp">http://www.munich-airport.de/de/consumer/index.jsp</a>
MvD	Meteorologe vom Dienst	
MWO	<i>Meteorological Watch Office</i>	Flugwetterüberwachungsstelle
MWP	<i>Mountain Wave Project</i>	Gebirgswellenprojekt der OSTIV zur weltweiten Erforschung von Schwerewellen und Rotoren mit Hilfe instrumentierter Hochleistungssegelflugzeuge
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>	Zivile US-Bundesbehörde für Luft- und Raumfahrt
NAVSIM		Von Rokitanzky/Universität Salzburg entwickeltes globales Flugverkehrssimulationsmodell, <a href="http://www.4d-aerospace.com/projects_references.html">http://www.4d-aerospace.com/projects_references.html</a>
NCEP GFS	<i>US National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System</i>	Numerisches Wettervorhersagemodell der NOAA, <a href="http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/">http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/</a>
NextGen	<i>Next Generation Air Transportation System</i>	Projekt zur Modernisierung des Luftfahrttransportsystems in den USA, Pendant zum Europäischen Programm SESAR
NILU	<i>Norwegian Institute for Air Research</i>	
NinJo		DWD-System zur Visualisierung meteorologischer Daten
NinJo-Batch		Vollständig automatische, meist sequenzielle Stapelverarbeitung von Daten im NinJo-System
N*ICE	<i>N*ICE Aircraft Services &amp; Support GmbH</i>	Für die Flugzeugenteisung am Frankfurter Flughafen zuständiges Unternehmen, <a href="http://www.nice-services.aero/">http://www.nice-services.aero/</a>
NMOC	<i>Network Manager Operations Centre</i>	<a href="http://www.eurocontrol.int/network-operations">http://www.eurocontrol.int/network-operations</a>
NOP	<i>Network Operations Portal</i>	<a href="https://www.public.cfm.eurocontrol.int/PUBPORTAL/gateway/spec/index.html">https://www.public.cfm.eurocontrol.int/PUBPORTAL/gateway/spec/index.html</a>
NOTAM	<i>NOTice(s) To AirMen</i>	Wichtige Nachrichten, Anordnungen und Informationen für Luftfahrer
Nowcasting		Kürzestfristvorhersage mit einer maximalen Dauer von etwa 6 Stunden
NWCSAF	<i>Satellite Application Facility on Support to Nowcasting and Very Short Range Forecasting</i>	Kooperation mehrerer nationaler Wetterdienste unter Koordination von EUMETSAT zur Nutzung von meteorologischen Satellitendaten für Nowcasting. <a href="http://www.nwcsaf.org/">http://www.nwcsaf.org/</a>

Abkürzung/ Objekt	Ausgeschriebener Begriff	Erläuterung *
NWP	<i>Numerical Weather Prediction</i>	Numerische Wettervorhersage
NWV	Numerische Wettervorhersage	
ONERA	<i>Office national d'études et de recherches aérospatiales</i>	Französisches Luftfahrtforschungszentrum
OFA	<i>Operational Focus Area</i>	Operationelles Schwerpunktgebiet, Zusammenschluss von Projekten innerhalb SESARs mit einem gemeinsamen operationellem Schwerpunkt
OSTIV	<i>Organisation Scientifique et Technique Internationale du Vol a Voile</i>	Wissenschaftliche und technische Organisation für den Segelflug; fördert den Erfahrungsaustausch zwischen Experten und Piloten auf verschiedenen Gebieten des Segelflugs
P2P	<i>Probabilistic Two-Phase Wake Vortex Decay and Transport Model</i>	Probabilistisches 2-Phasen-Wirbelschleppentransport- und Zerfallsmodell
pc_met		Selfbriefing System für Flugwetterinformationen des DWD, wird vom Internet-Portal <a href="http://www.flugwetter.de">www.flugwetter.de</a> abgelöst
PIA	<i>Prognostic Icing Algorithm</i>	Prognosealgorithmus des Vereisungswarnsystems ADWICE zur Vorhersage von Vereisungsräumen über Europa mit Ausgabeprodukt PIP ( <i>prognostic icing product</i> )
PIREP	<i>Pilot weather report</i>	Vom Piloten zur Flugsicherung abgesetzte Meldung zu besonderen Wettererscheinungen
POLDIRAD	Polarimetrisches Doppler-Wetterradar	am DLR Oberpfaffenhofen, <a href="http://www.pa.op.dlr.de/poldirad/index_p.html">http://www.pa.op.dlr.de/poldirad/index_p.html</a>
QEvC	<i>Quality Evaluation Centre</i>	Qualitätsbewertungszentrale für AMDAR Daten
Rad-TRAM	<i>Radar Tracking and Monitoring</i>	Auf Radardaten basierendes Diagnose- und Nowcastsystem von Gewittern am DLR (Kober und Tafferner, 2009)
RASS	<i>Radio Acoustic Sounding System</i>	Kombiniert radiometrische und akustische Fernerkundung von Profilen der virtuellen Temperatur
RECAT	<i>Re-Categorization</i>	Internationale Initiative der ICAO unter Leitung von FAA und EUROCONTROL zur Harmonisierung der Wirbelschleppenseparationen für existierende und neue Flugzeuge
RISK-AWARE	<i>Risk Advanced Weather forecast system to Advise on Risk Events and management</i>	Projekt zu Extremwetterereignissen im Rahmen der europäischen CAD-SES Gemeinschaftsinitiative zur transnationalen Zusammenarbeit, <a href="http://www.smr.arpa.emr.it/riskaware/">http://www.smr.arpa.emr.it/riskaware/</a>
RLM	<i>Relocatable Local Model</i>	Verschiebbare Version des COSMO-EU für Einsatzgebiete der Bundeswehr
RLMK	<i>Relocatable Local Model „Kürzestfrist“</i>	Verschiebbare Version des COSMO-DE für Einsatzgebiete der Bundeswehr mit Randwerten aus dem RLM
RVR	<i>Runway Visual Range</i>	Pisten- oder Landebahnsichtweite
RVSM	<i>Reduced Vertical Separation Minimum</i>	Reduzierte Vertikalstaffelung, <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/Reduced_vertical_separation_minima">http://en.wikipedia.org/wiki/Reduced_vertical_separation_minima</a>
SAFIRE ATR-42		Französisches Forschungsflugzeug, <a href="http://www.safire.fr/web/">http://www.safire.fr/web/</a>
SAR	<i>Search And Rescue</i>	International in staatlichem Auftrag tätige Such- und Rettungsdienste für Notfälle in der Luft- und Seefahrt
SES	<i>Single European Sky</i>	EU-Initiative zur Vereinheitlichung des europäischen Luftraumes, <a href="http://www.eurocontrol.int/dossiers/single-european-sky">http://www.eurocontrol.int/dossiers/single-european-sky</a>

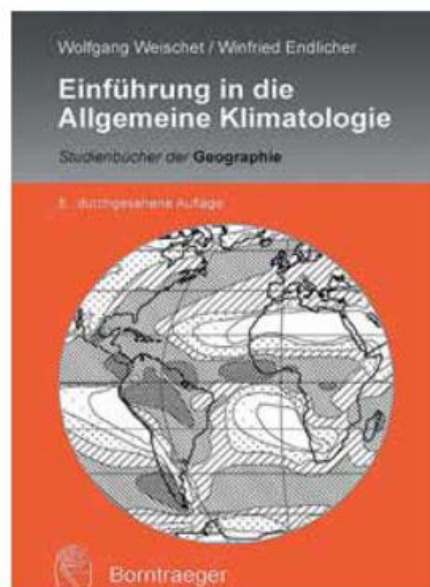
Abkürzung/ Objekt	Ausgeschriebener Begriff	Erläuterung *
SESAR	<i>Single European Sky ATM Research</i>	Europäische Forschungsinitiative für einen einheitlichen, europäischen Luftraum SES, <a href="http://www.eurocontrol.int/sesar-research">http://www.eurocontrol.int/sesar-research</a>
SGS	<i>subgridscale</i>	Subgridskaliig oder Subgrid-Scale
SHAPE	<i>Simplified Hazard Area Prediction Method</i>	Methode zur Bewertung des Schweregrads einer Wirbelschleppenbegegnung
SHR SKV SOW		Quellterme turbulenter kinetischer Energie
SID	<i>Standard Instrumental Departure</i>	Standardabflugroute
SIGMA	<i>System of Icing Geographic identification in Meteorology for Aviation</i>	Französisches Nowcastsystem für Flugzeugvereisung über Frankreich, <a href="http://presentations.copernicus.org/EMS2011-874_presentation.pdf">http://presentations.copernicus.org/EMS2011-874_presentation.pdf</a>
SIGMET	<i>SIGNificant METeorological phenomena</i>	Warnung vor signifikanten Wettererscheinungen starker Intensität für Flugzeuge in der Luft, getrennt für FIR und UIR
SJU	<i>SESAR Joint Undertaking</i>	Europäische öffentliche-private Partnerschaft zwischen EUROCONTROL, der Europäischen Kommission und 15 Industriepartnern der Luftfahrtbranche
SKE	<i>Subgrid scale Kinetic Energy</i>	SGS kinetische Energie
SLD	<i>Supercooled Large Droplets</i>	Unterkühlte Nieseltropfen
SODAR	<i>Sound Detecting And Ranging</i>	Akustisches Fernerkundungsverfahren von Windprofilen, auch in Kombination mit RASS
SNOWTAM		NOTAM zum Winterdienst am Flughafen, informiert über das Vorhandensein oder die Räumung von Schnee, Schneematsch, Eis oder Wasser auf den Bewegungsflächen
strategisch		Langfristig/großes Operationsgebiet/weltweit
SWC	<i>Significant Weather Chart</i>	Wetterkarte signifikanter Wettererscheinungen für (Low Level) LL SWC: Boden/FL240 (Deutschland) Medium Level SWC: FL100/450 (Europa) High Level SWC: FL 250/630 (Long Range)
SWIM	<i>System Wide Information Management</i>	Netz für Informationsübermittlung in SESAR zur Verbindung aller Akteure im Flugverkehrsmanagement <a href="http://www.sesarju.eu/programme/highlights/swim-atm-intranet">http://www.sesarju.eu/programme/highlights/swim-atm-intranet</a>
SYNOP	Synoptische Observation	Verschlüsselte Bodenwettermeldung einer Landstation zu bestimmten festgelegten Terminen
SYNSAT SYNRAD	<i>Synthetic Satellite Images Synthetic Radar Images</i>	SYNSATs beziehungsweise SYNRADs sind synthetische Satellitenbeziehungsweise Radarbilder, die aus Daten eines numerischen Modells gewonnen werden
TAF	<i>Terminal Aerodrome Forecast</i>	Flugplatzwettervorhersage, für jeden internationalen Verkehrslandeplatz, verschlüsselt nach WMO-Codierungsvorschrift FM51, in regelmäßigen Zeitabständen erneuert
taktisch		Mittelfristig/mittleres Operationsgebiet/Nahbereich
TAMDAR	<i>Tropospheric Airborne Meteorological Data Reporting</i>	Halbautonomes, auf Verkehrsflugzeugen montierbares Messsystem für Druck, Temperatur, Feuchte, Wind, Vereisung und Turbulenz (Beschleunigungen), das die Daten über ein separates, vom Flottenbetreiber unabhängiges Satellitenkommunikationsnetz und ein angeschlossenes Kontrollzentrum an einen Wetterdienst sendet.

Abkürzung/ Objekt	Ausgeschriebener Begriff	Erläuterung *
TAS	<i>True AirSpeed</i>	Wahre Fluggeschwindigkeit relativ zur Luft
TASIL		En-Route-Wegpunkt im brasilianischen Luftraum über dem Nordatlantik (Koordinaten: 4° 0' 18N, 29° 59' 24W)
TDL	<i>Tunable Diode Laser</i>	Abstimmbarer Dioden-Laser
TEMP		Kurzform für Daten eines Radiosondenaufstiegs
TJSIT	<i>Turbulence Joint Safety Implementation Team</i>	Vereinigung verschiedener Institutionen in den USA zur Festlegung und Umsetzung von Sicherheitsstandards für erhöhte Turbulenzsicherheit
TKE	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	Massendichte der kinetischen Energie der Luftströmung im turbulenten Längenskalenbereich
TMA	<i>Terminal Manoeuvring Area</i>	Nahverkehrsbereich und Luftraumsektor eines Flughafens
TMOS	<i>Model Output Statistics</i> MOS für Turbulenz	Beim DWD entwickeltes Programmpaket zur Berechnung und statistischen Aufbereitung von Turbulenzkenngrößen aus abgespeicherten Modellausgabefeldern
TOPTASK		Umfassende Modellvorhersage für Segelflieger
TOPTHERM		Thermikbezogener Teil von TOPTASK
TREND		Entwicklungsvorhersage für die nächsten 2 Stunden in verkürzter METAR-Form
T-REX	<i>Terrain-induced Rotor Experiment</i>	Internationales Feldexperiment 2006 in Nevada zu gebirgsinduzierten Rotoren
TSS	<i>True Skill Statistic</i>	Statistisches Gütemaß über die Fähigkeit, ein Ereignis richtig vorherzusagen.
UAS/UAV	<i>Unmanned Aerial System, auch: Unmanned Aircraft Systems, Unmanned Aerial Vehicle</i>	Unbemanntes Luftfahrzeug, Drohne
UIR	<i>Upper Flight Information Region</i>	Oberes Fluginformationsgebiet, bis FL 460
UK Met Office		Britischer Wetterdienst
UK CAA	<i>UK Civil Aviation Authority</i>	Britische Flugaufsichtsbehörde
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>	Koordinierte Weltzeit, löste Greenwich Mean Time (GMT) als Weltzeit ab
VA	<i>Volcanic Ash</i>	Vulkanasche
VAA	<i>Volcanic Ash Advisories</i>	Von VAACs verbreitete Warnungen und Informationen zu einem aktuellen Vulkanascheereignis

Abkürzung/ Objekt	Ausgeschriebener Begriff	Erläuterung *
VAAC	<i>Volcanic Ash Advisory Center</i>	Internationale Warnzentren für Vulkanasche (neun weltweit)
VFR	<i>Visual Flight Rules</i>	Sichtflug(regeln), Gegensatz zu Instrumentenflug (IFR); der Sichtflug wird vor allem in der Allgemeinen Luftfahrt in geringeren Höhen, in Kleinflugzeugen und mit Luftsportgeräten angewendet, aber auch bei militärischen Tiefflügen
VERA System	<i>Vienna Enhanced Resolution Analysis System</i>	Mesoskaliges Echtzeit Datenanalyseverfahren, entwickelt am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien, <a href="http://www.univie.ac.at/amk/vera/">http://www.univie.ac.at/amk/vera/</a>
VESA	<i>Vortex Encounter Severity Assessment</i>	Flugdynamiksimulation zur Bewertung der Schwere von Wirbelschleppenbegegnungen
VIS	<i>Visibility</i>	Meteorologische Sichtweite, definiert als die größte Distanz, über die ein schwarzes Objekt im Tageslicht gegen den Horizont erkannt werden kann.
VIS-AERO	<i>Visibility for aeronautical purposes</i>	Sichtweite für die Luftfahrt, definiert durch den größeren Wert der beiden Merkmale a) VIS oder b) die größte Distanz, bei der Lichter mit 1000 cd gegen einen unbeleuchteten Hintergrund identifiziert werden können.
VMC	<i>Visual Meteorological Conditions</i>	Sichtflugbedingungen
VR	<i>Visual Range</i>	Meteorologische Sichtweite, definiert durch die Distanz, bei der der Kontrast eines Objekts zu seinem Hintergrund gleich dem Schwellwert eines Beobachters ist.
WAFC	<i>World Area Forecast Center</i>	WAFCs in London und Washington stellen internationale Wetterinformationen für die Flugplanung zur Verfügung.
WakeScene		Softwarepaket zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit von Wirbelbegegnungen für verschiedene Luftverkehrsszenarien
WEPS	<i>Wake Encounter Prevention System</i>	Flugzeuggestütztes Wirbelschleppenwarnsystem (AIRBUS <i>et al.</i> )
WHITE	<i>Winter Hazards in Terminal Environment</i>	DLR-Winterwettervorhersagesystem für Flughafennahbereich
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>	Weltorganisation für Meteorologie, Sonderorganisation der Vereinten Nationen (UN), <a href="http://www.wmo.int/pages/index_en.html">http://www.wmo.int/pages/index_en.html</a>
WSVBS	<i>Wake Vortex Prediction and Monitoring System</i>	Wirbelschleppenwarnsystem des DLR
WSWS	<i>Wake Vortex Warning System</i>	Wirbelschleppenwarnsystem der DFS am Flughafen Frankfurt
WVSS-II	<i>Water Vapor Sensing System II</i>	Produktname für ein Wasserdampfmesssystem des Herstellers Spectra-Sensors Inc. für AMDAR etc., das auf einem optischen Relativverfahren basiert
WWW	<i>World Weather Watch</i>	WMO-Programm zur Kombination und Koordination der globalen Beobachtungs- und Kommunikationssysteme
WxFUSION	<i>Weather Forecast User-Oriented System Including Object Nowcasting</i>	Beobachtungs- und Nowcastsystem des DLR (Tafferner, A. und C. Forster, 2012), <a href="http://www.wxfusion.com">http://www.wxfusion.com</a>
WXXM	<i>Weather Information Exchange Model</i>	Wetterbezogener Datenstandard für Anwendungen in der Luftfahrt, <a href="http://www.sesarju.eu/programme/highlights/swim-atm-intranet">http://www.sesarju.eu/programme/highlights/swim-atm-intranet</a>
ZGeoBw	Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr	Früher: Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr (AGeoBw)

\* International übliche Begriffe und Abkürzungen finden sich häufig im Dokument Doc 8400 der ICAO, <http://www.icao.int>. Dieses kann zum Beispiel unter [http://www.emfa.pt/infoaero/conteudos/galeria/ICAO/Digitalizados/ICAO\\_ABBR\\_CODES.pdf](http://www.emfa.pt/infoaero/conteudos/galeria/ICAO/Digitalizados/ICAO_ABBR_CODES.pdf) oder <http://dcaa.trafikstyrelsen.dk:8000/icaodocs/Doc%208400/ICAO%20Abbreviations%20and%20Codes%20-%202007.pdf> oder [http://www1.atmb.net.cn/CD\\_web/Upload File/2013052810480238.pdf](http://www1.atmb.net.cn/CD_web/Upload File/2013052810480238.pdf) eingesehen werden.

## Buchbesprechung



WOLFGANG WEISCHET, WILFRIED ENDLICHER, 2012: *Einführung in die Allgemeine Klimatologie*. 8. durchgesehene Auflage, Studienbücher der Geographie. Borntraeger-Verlagsbuchhandlung Berlin und Stuttgart, 342 Seiten, 29,00 €.

In der Reihe „Studienbücher der Geographie“ des Borntraeger-Verlages erschien 2012 die 8. durchgesehene Auflage der „Einführung in die Klimatologie“. Die Studienbücher richten sich nach Information des Verlages an „Studierende zum ergänzenden Eigenstudium, den Lehrern des Faches zur Fortbildung und an den Einzelthemen interessierten Angehörigen anderer Fächer zur Einführung in Teilgebiete der Geographie“. Gegenüber der 7. Aufla-

ge von 2007 wurden einige Abschnitte gestrafft und in einigen Kapiteln aktuelle Daten ergänzt. Dies betrifft insbesondere das aktuelle Thema des Klimawandels.

Die Allgemeine Klimatologie wird in 18 thematisch aufeinander aufbauenden Kapiteln dargelegt. Ein Literaturverzeichnis, Internetadressen, eine Zusammenstellung wichtiger Maßeinheiten und Umrechnungsformeln sowie ein Sachregister ergänzen den Text.

In den ersten vier Kapiteln werden die Grundlagen des Klimasystems der Erde erläutert, beginnend mit der Definition des Klimas in seinen Raum- und Zeitdimensionen und der Kugelgestalt der Erde und den sich ergebenden Beleuchtungszonen. Die Sonnenstrahlung als Antrieb des Klimasystems und die Atmosphäre schließen sich an.

Der Strahlung sind die Kapitel 5-7 gewidmet. Ausgehend von der kurzwelligen Sonnenstrahlung und ihrer Modifikation beim Durchgang durch die Atmosphäre einschließlich der Absorption bzw. Reflektion spätestens an der Erdoberfläche werden die entstehende langwellige Ausstrahlung der Erde und ihre Strahlungsbilanz behandelt.

Über die Energiebilanz an der Erdoberfläche (Kapitel 8) wird anschließend im Kapitel 9 die Lufttemperatur einschließlich ihrer zeitlichen und räumlichen Verteilung diskutiert.

Der Luftdruck als fundamentale meteorologische Größe und die aus seinen räumlichen Unterschieden resultierende Strömung (Wind) sind Thema des Kapitels 10 und 11.

Der Wasserdampf in der Atmosphäre, vertikale Luftbewegungen, die Prozesse der Wolkenbildung und letztendlich der Niederschlag werden in den Kapiteln 12-14 behandelt.

Die Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre wird ausführlich im Kapitel 15 dargelegt. Wichtige mesoskalige Besonderheiten wie das Stadtklima schließen sich im Kapitel 16 an. Weiterhin werden atmosphärische Gefahren, wie Hitze, Starkniederschläge und Stürme behandelt. Abschließend wird auf den Klimawandel eingegangen, der zu Recht als das „größte Umweltproblem des 21. Jahrhunderts“ bezeichnet wird.

Das sehr lesenswerte Buch zeichnet sich durch eine klare und exakte Sprache sowie sehr gut gestaltete und verständliche Abbildungen aus und kann über den oben genannten Personenkreis auch Meteorologen und Klimatologen uneingeschränkt empfohlen werden. Für die 9. Auflage wäre eine Vereinheitlichung der physikalischen Einheiten (zum Beispiel im Kapitel 7) zu wünschen.

Birger Tinz

**Adressen der Autoren dieses Heftes**

## FLUGMETEOROLOGIE HEFT II

DIPL. MET. AXEL BARLEBEN  
Abteilung Flugmeteorologie  
Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach/Main  
Axel.Barleben@dwd.de

ALEXANDER DIEHL  
Betriebsleitung Flugwetterdienst  
Abteilung Flugmeteorologie  
Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach/Main  
Alexander.Diehl@dwd.de

DR. CLEMENS DRÜE  
Fach Umweltmeteorologie  
Fachbereich VI - Raum- und Umweltwissenschaften  
Universität Trier  
54286 Trier  
druee@uni-trier.de

PROF. DR. DIETER ETLING  
Institut für Meteorologie und Klimatologie  
Leibniz-Universität Hannover  
Herrenhäuser Str. 2  
30419 Hannover  
etling@muk.uni-hannover.de

DR. CAROLINE FORSTER  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Institut für Physik der Atmosphäre  
Münchner Straße 20  
82234 Oberpfaffenhofen-Wessling  
caroline.forster@dlr.de

PROF. DR. THOMAS HAUF  
Institut für Meteorologie und Klimatologie  
Leibniz-Universität Hannover  
Herrenhäuser Str. 2  
30419 Hannover  
hauf@muk.uni-hannover.de

DIPL.-MET. RENÉ HEISE  
Geoinformationszentrum der Luftwaffe  
Luftwaffenkaserne  
Manfred-von-Richthofen-Str. 8-12  
48145 Münster  
ReneHeise@bundeswehr.org

DR. AXEL HOFF  
Abteilung Messnetze und Daten  
Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach  
Axel.Hoff@dwd.de

DR.-ING. HABIL. FRANK HOLZÄPFEL  
Institut für Physik der Atmosphäre  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
82234 Oberpfaffenhofen  
frank.holzaepfel@dlr.de

DIPL.-MET. FRANK KALINKA  
Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung  
Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach  
frank.kalinka@dwd.de

FELIX KEIS  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Physik der Atmosphäre  
Wolkenphysik und Verkehrsmeteorologie  
Münchner Straße 20  
82234 Oberpfaffenhofen  
Felix.Keis@dlr.de

BERTHOLD LESCHER  
Luftfahrtberatungszentrale Mitte  
Deutscher Wetterdienst  
FAC 2 Gebäude 149 E  
60549 Frankfurt-Flughafen  
Berthold.Lescher@dwd.de

DIPL.-MET. THOMAS PRENOSIL  
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr  
Kommerner Str. 188  
53879 Euskirchen  
ThomasPrenosil@bundeswehr.org

DIPL.-MET. MATTHIAS RASCHENDORFER  
Abteilung Meteorologische Analyse und Modellierung  
Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach/Main  
Matthias.Raschendorfer@dwd.de

KATHARINA ROLOFF, M.SC.  
Institut für Meteorologie und Klimatologie  
Leibniz-Universität Hannover  
Herrenhäuser Str. 2  
30419 Hannover  
roloff@muk.uni-hannover.de

DIPL.-MET. WILHELM RUHE, M.SC./NU-IRL.  
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr  
Frauenbergerstraße 250  
53879 Euskirchen  
WilhelmRuhe@Bundeswehr.org

HANS-DIETER SAFFRAN  
Luftfahrtberatungszentrale München  
Deutscher Wetterdienst  
Terminalstraße Mitte 18  
85356 München-Flughafen  
hans-dieter.saffran@dwd.de

PROF. DR. REINHOLD STEINACKER  
Institut für Meteorologie und Geophysik  
Universität Wien  
Althanstrasse 14  
A-1090 Wien  
Österreich  
Reinhold.Steinacker@univie.ac.at

BENEDIKT STOCKHAUSEN, B.SC.  
Meteorologisches Institut  
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn  
Auf dem Hügel 20  
53121 Bonn  
miub@uni-bonn.de

DR. ARNOLD TAFFERNER  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Institut für Physik der Atmosphäre  
Münchner Straße 20  
82234 Oberpfaffenhofen-Wessling  
arnold.tafferner@dlr.de

MAG. SARAH UMDASCH  
Institut für Meteorologie und Geophysik  
Universität Wien  
Althanstrasse 14  
A-1090 Wien  
Österreich  
sarah.umdach@univie.ac.at

STEFFEN WENZEL-HALANGK  
Fraport AG  
60549 Frankfurt-Flughafen  
s.wenzel-halangk@fraport.de

PROF. DR. BERNADETT WEINZIERL  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Physik der Atmosphäre  
Oberpfaffenhofen  
82234 Weßling  
Bernadett.Weinzierl@dlr.de

HANS-RUDI SONNABEND  
Meteorological Services  
Lufthansa Systems Aeronautics GmbH  
FRA OD/N-M  
Am Prime Parc 2  
65479 Raunheim  
hans-rudi.sonnabend@lhsystems.com

## **Corrigenda**

zu Jahrgang 38, Heft 3/4 („Aktuelle Aspekte der Flugmeteorologie I – Grundlegendes“)

- Seite 1: Bei Beitrag 7 lautet die richtige Reihenfolge der Autoren: D. DANIEL, R. HEISE, D. THIEL
- Seite 133 f.: Die Legenden der Abbildungen 2-2 und 2-3 sind vertauscht.
- Seite 147: Die Flugbetriebsstufen in Tab. 4-2 sind falsch bezeichnet, richtig ist die Reihung: „CAT I, CAT II, CAT IIIA, CAT IIIB, CAT IIIC“.
- Seite 220: Die aktuelle Adresse von DIPL.-MET. RENÉ HEISE ist:  
Geoinformationszentrum der Luftwaffe, Luftwaffenkaserne, Manfred-von-Richthofen-Str. 8-12,  
48145 Münster, ReneHeise@bundeswehr.org.

---

**promet**

## **Vorschau auf die nächsten Hefte**

- Meteorologische Aspekte regenerativer Energien (Fachredaktion: Dr. D. Heinemann)
- Hochgebirgsmeteorologie und Glaziologie (Fachredaktion: Dr. W. Schöner)
- Regionale Klimamodellierung I (Fachredaktion: N.N., Dr. B. Früh)