

## Aktuelle Aspekte der Flugmeteorologie I - Grundlegendes

38. Jahrgang, Heft 3/4, Aktuelle Aspekte der Flugmeteorologie I - Grundlegendes



promet



**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. Brümmel (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**

Fotolia, Verkehrsflugzeug und Flughafentower  
in München, M. Hauf, Landeanflug auf den  
Flughafen in Lukla/Nepal

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.

**Druck**

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

**Bezug**

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

ISSN 0340-4552 (Druck)  
ISSN 2194-5950 (Internet)

**Auflage:** 3600

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

**Redaktionsschluss:** 20.1.2014

**Editorial**

Liebe Leserinnen und Leser,

nach langer Zeit nimmt sich die Fortbildungszeitschrift Promet wieder einmal flugmeteorologischen Fragestellungen an. Bei der Vorbereitung ist dabei eine solche Vielzahl von interessanten Einzelthemen hervorgetreten, dass wir uns entschlossen haben, gleich zwei Hefte zu produzieren. Dieses erste Heft beschäftigt sich mit grundlegenden aktuellen Aspekten der Flugmeteorologie. Das zweite Heft, das in wenigen Monaten nachfolgt, beinhaltet dann vor allem Beiträge zu den meteorologischen Risiken und Gefahren der Luftfahrt. An dieser Stelle danke ich Herrn Professor Thomas Hauf (Universität Hannover) für die Übernahme der Fachredaktion und Herrn Professor Ulrich Schumann (DLR) für die fachliche Durchsicht der Beiträge ausdrücklich.

Wie Sie bestimmt schon gemerkt haben, erscheinen die Promethefte seit einiger Zeit in neuem Design. Es orientiert sich an den aktuellen Corporate Identity-Vorgaben des DWD. Mit diesem Heft wurde auch die zweite Umschlagseite neu strukturiert und für das Inhaltsverzeichnis mehr Platz geschaffen.

Promet erscheint in der Regel als Doppelheft (mit einem Umfang von etwa 80 bis 110 Seiten), und zwar zwei Mal im Jahr. Leider ist es unmöglich, einen regelmäßigen Erscheinungszeitpunkt zu garantieren. So werden wir mit dieser Ausgabe erst den 38. Jahrgang abschließen, sind also mit der Herausgabe der Hefte im Verzug. Wir werden uns jedoch bemühen, diese Verzögerung aufzuholen, und hoffen, in diesem Jahr ausnahmsweise drei Doppelhefte produzieren zu können. Immerhin konnten wir aber bei der Veröffentlichung der Examinalisten schon aufholen: Für die Jahre 2011 und 2012 finden Sie alle Absolventen und die Titel ihrer Arbeiten in diesem Heft.

Inzwischen gewinnt Open Access zunehmend an Bedeutung. Auch Promet ist eine Open Access-Zeitschrift, denn nach etwa einem Jahr ist die zuvor gedruckte Ausgabe frei im Internet als Zweitveröffentlichung („grüner Weg“) verfügbar. Das ganze Promet-Archiv finden Sie übrigens unter [www.dwd.de/promet](http://www.dwd.de/promet).

Eine interessante und lohnende Lektüre wünscht Ihnen  
Ihr Schriftleiter  
Jörg Rapp

**promet**

**Vorschau auf die nächsten Hefte**

- Aktuelle Aspekte der Flumeteorologie II - Mit dem Wetter leben (Fachredaktion: Prof. Dr. T. Hauf)
- Meteorologische Aspekte regenerativer Energien (Fachredaktion: Prof. Dr. D. Heinemann)
- Regionale Klimamodellierung I (Fachredaktion: Prof. Dr. D. Jacobs, Dr. B. Früh)
- Hochgebirgsmeteorologie und Glaziologie (Fachredaktion: Dr. W. Schöner)

# Inhalt

38. Jahrgang, Heft 3/4

Thema des 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  |         |
| <b>1</b> Bedeutung und Aufgaben der Flugmeteorologie - heute und morgen                                  | 119-125 |
| H. PÜMPEL  |         |
| <b>2</b> Die Flugmeteorologie als Modell internationaler Zusammenarbeit                                  | 126-134 |
| S. KOOS  |         |
| <b>3</b> Der „Single European Sky“ und das Wetter - die Aufgaben der Flugwetterdienste im SESAR-Programm | 135-142 |
| M. KERSCHBAUM  |         |
| <b>4</b> Wetter im Luftverkehrsmanagement  | 143-156 |
| M. SAUER, T. GERZ  |         |
| <b>5</b> Wettereinfluss auf Sicherheit und Effizienz im Luftverkehr - Analysen und Minimierungskonzepte  | 157-165 |
| M. RIEDIGER  |         |
| <b>6</b> Meteorologische Information für die Flugdurchführung  | 166-171 |
| D. DANIEL, R. HEISE, D. THIEL  |         |
| <b>7</b> Geoinformationsberatung in Einsatzgebieten der Bundeswehr                                       | 172-179 |
| K. SIEVERS   |         |
| <b>8</b> Wetterinformationen für Piloten - die Praxis  | 180-188 |
| M. STREICHER   |         |
| <b>9</b> Fallstudie eines wetterbedingten Flugunfalls  | 189-192 |
| R. SAUSEN, S. MATTHES  |         |
| <b>10</b> 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     |

## Inhalt des folgenden 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

Zu diesem Heft (T. Hauf)

W. RUHE

- 11 Verhütung von Vogelschlag mit Hilfe meteorologischer Informationen

T. PRENOSIL, B. STOCKHAUSEN

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

F. HOLZÄPFEL

- 13 Flugzeug-Wirbelschleppen - von der Grundlagenforschung zur Anwendung

M. RASCHENDORFER, A. BARLEBEN

- 14 Vorhersage fluggefährdender Turbulenz und ihre Registrierung

R. HEISE, D. ETLING

- 15 Schwerewellen und Rotoren

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

- 16 Gewittervorhersage

K. ROLOFF, F. KALINKA, T. HAUF

- 17 Flugzeugvereisung

K. ROLOFF, B. LESCHER

- 18 Winterwetteroperationen am Beispiel des Verkehrsflughafens Frankfurt/Main

F. KEIS, A. TAFFERNER

- 19 Nowcasting von Winterwetter am Flughafen München

R. STEINACKER, S. UMDASCH

- 20 Die meteorologische Sichtweite

A. DIEHL, B. WEINZIERL

- 21 Vulkanasche und Vorhersage: Was haben wir aus dem Ausbruch des Eyjafjallajökull 2010 gelernt?

A. HOFF, C. DRÜE, H.-R. SONNABEND

- 22 Verkehrsflugzeuge als meteorologische Beobachtungssysteme

Glossar

Anschriften der Autoren dieses Heftes

## Aktuelle Aspekte der Flugmeteorologie I - Grundlegendes

### Zu diesem Heft



Die Absturzstelle des Ikarus im Gemälde „Landschaft mit dem Sturz des Ikarus“ von Pieter Bruegel dem Älteren (entstanden um 1555-68). (Original: Koninklijke Musea voor Schone Kunsten van België)

Dädalus belehrte auch seinen Sohn, und sagt, „Ich ermahne Dich, Ikarus, halte dich auf mittlerer Bahn, damit, wenn Du zu tief kommst, die Wellen nicht die Federn beschweren, und wenn du zu hoch fliegst, das Feuer sie nicht versenge. Zwischen beiden fliege! Ich befehle dir auch, nicht den Bootes, den großen Wagen oder das gezückte Schwert des Orion anzuschauen. Nimm deinen Weg unter meiner Führung.“ Zugleich gibt er ihm weitere Ratschläge und passt die unbekanntenen Flügel seinen Schultern an.

Reinhard May:  
..... Über den Wolken muss die Freiheit  
wohl grenzenlos sein.....

*Es handelt sich wohl um die erste Flugwetterberatung der Menschheitsgeschichte. Fliege im Luftraum oberhalb der Gischt des Meeres und unterhalb des Schmelzniveaus deines Flügelwachses! So Dädalus zu seinem Sohn Ikarus. Im Genuss der scheinbar grenzenlosen Freiheit des Fliegens missachtet dieser die Zulassungsgrenzen seines Fluggerätes, steigt zu hoch auf, die Sonne lässt die mit Wachs zusammengeklebten Flügel schmelzen und er stürzt ab. Interessanterweise wird nicht die Machbarkeit des Fliegens selbst in Frage gestellt, sondern nur die Missachtung der gesetzten Anweisungen. Und es sind atmosphärische Bedingungen, die hätten beachtet werden sollen. Wohlweislich hat Reinhard May zweitausend Jahre später seine Aussage der grenzenlosen Freiheit in den Konjunktiv gesetzt. Denn es gibt, so wissen wir alle, neben den operationellen Grenzen auch schlechtes Wetter, das dem Traum vom Fliegen Grenzen setzt. Welche Grenzen sind dies? Kann man sie vermeiden? Um diese Fragen geht es in diesen beiden vorliegenden Heften zur Flugmeteorologie.*

*Worum geht es dem Menschen, der heute in ein Flugzeug steigt? Zusammengefasst lässt es sich so formulieren: Der Mensch von heute möchte zu einer von ihm selbst bestimmten Zeit sicher, schnell, kostengünstig und bei minimaler Umweltbelastung an sein Ziel kommen. Schlechtes Wetter in Form von Gewitter mit Hagel, Blitz, Turbulenz und nasser Landebahn, Schneefall, Eis am Flugzeug und auf Start- und Landebahn, auch gelegentlich Vulkanasche und Sandstürme behindern ihn in der Umsetzung dieses Zieles. Deshalb müssen diese wetterbedingten Hindernisse erkannt, das fliegerische Risiko vom Piloten beurteilt und der betroffene Luftraum gegebenenfalls vermieden werden.*

*Die Flugmeteorologie hilft dem Piloten dabei, indem sie alle verfügbaren Informationen aus Beobachtung und Simulation in geeigneter Weise zusammenfügt und ein möglichst genaues momentanes und zukünftiges Gefahrenbild abgibt. Der erste Luftfahrerwarndienst in Deutschland entstand so aus diesem Bedarf heraus schon 1911, wenige Jahre nachdem den amerikanischen Brüdern Wright die ersten photographisch dokumentierten motorisierten Flüge gelangen.*

*Sicherheit hat ihren Preis. Vermeidung von Wetterrisiken bedeutet daher fast immer auch Zeitverlust und zusätzliche Kosten. Jedoch hilft eine genaue Kenntnis der Schlechtwettergebiete nicht nur die Risiken zu mindern, sondern auch die Kosten der Risikominderung zu senken.*

*Nicht nur das Wetter legt dem Flugverkehr Schranken auf, sondern auch vorausfliegende Flugzeuge selbst. Die von diesen Flugzeugen erzeugten Wirbelschleppen stellen eine Gefahr dar und müssen gemieden werden. Es müssen Mindestabstände zweier aufeinanderfolgender Flugzeuge eingehalten werden, was die maximale Landefrequenz und damit auch die ökonomisch bedeutende Kapazität eines Flughafens bestimmt.*

*Aber auch die Umwelt wird durch den Flugverkehr beeinflusst: Lärm beeinträchtigt die Lebensqualität der Flughafenrainer und Abgase verändern das Klima.*

*Flugzeuge überwinden Grenzen in Minutenschnelle. Der Luftverkehr vernetzt Personen- und Gütertransport global. Er ist nicht mehr nur die Summe der Einzelflüge, sondern zeigt systemisches Verhalten. Verspätungen breiten sich durch das Netz der Flugverbindungen aus, Störungen können weit ab von ihren Ursachen auftreten. Unser Freizeitverhalten, die Konsumgewohnheiten und eine ganze Industrie hängen an der Luftfahrt. Der Luftverkehr ist ein globales, internationales Phänomen geworden und aus unserem Leben nicht mehr wegzudenken.*

*In den vorliegenden Heften werden in 22 Beiträgen verschiedene wetterbezogene Aspekte des Luftverkehrs dargestellt. Von den einzelnen Wettergefahren bis zum Klimaeinfluss. Mögen diese Hefte damit einen Beitrag zum Verständnis des Zusammenhanges der beiden komplexen Systeme Wetter und Flugverkehr leisten und letztlich die Sicherheit und Effizienz im Luftverkehr erhöhen.*

*Thomas Hauf*

T. HAUF, K. STURM

# 1 Bedeutung und Aufgaben der Flugmeteorologie - heute und morgen

## Importance and Objectives of Current and Future Aviation Meteorology

### Zusammenfassung

Der Flugverkehr ist Teil und Träger des globalen Wandels mit deutlichen Konsequenzen für die Flugmeteorologie. So wird der globale Flugverkehr immer mehr als ein komplexes und hoch vernetztes System begriffen. Die Aufgaben der Flugmeteorologie wandeln sich von der Versorgung mit Routineprodukten für die sichere und pünktliche Flugdurchführung hin zur Entwicklung und Bereitstellung wetter-, region-, flughafen- und gegebenenfalls auch flugzeugspezifischer, diagnostischer und prognostischer Produkte. Darüber hinaus werden in Zukunft immer mehr flugmeteorologische Produkte in die ATC- und ATM-Entscheidungsprozesse integriert, um einen möglichst pünktlichen, kostengünstigen und klimaoptimierten Flugverkehr zu ermöglichen.

### Abstract

Aviation and aviation meteorology are part of global change. Air traffic is increasingly viewed as a complex and highly interconnected system. With that development the objectives of aviation meteorology change as well. The supply with standard aviation weather products for planning of safe and punctual flight planning does not meet the future requirements of the aviation community. New products with diagnosis and prognosis of adverse weather have to be developed. These products are specific for each weather hazard, region, airport and even for each aircraft. Aviation meteorological products will also become major components in ATC and ATM related decision making, to enable punctual, cost efficient and climate optimized routing.

## 1 Der Flugverkehr im Wandel

Keine Frage, der Flugverkehr hat zu dem, was wir unter globalem Wandel verstehen, im großen Maße beigetragen. Jede größere Stadt der Erde ist von überall her in weniger als 24 Stunden und mit maximal zwei Zwischenstopps erreichbar. In Europa können die Metropolen mit einem dichten Netz von Flugverbindungen in wenigen Stunden angefliegen werden. Über 56 Millionen Menschen arbeiten weltweit in der Luftfahrtindustrie und im luftfahrtbezogenem Tourismus, 5 Millionen davon direkt in der Luftfahrt (WORLD BANK 2012). Die Luftfahrt hat sich in den vergangenen Jahren kontinuierlich zu einem weltweit wichtigen Wirtschaftsfaktor und zu einem mächtigen Massenverkehrsmittel im grenzüberschreitenden Fernverkehr entwickelt. Die globale Luftfahrtindustrie ist damit essentiell für das ökonomische Wohlergehen der ganzen Welt.

Trotz der zurückliegenden ökonomischen Krisen ist die Wachstumsperspektive mit 4,5 % jährlichem Zuwachs und damit einer prognostizierten Verdoppelung der Passagierzahlen bis 2030 ungebrochen optimistisch. Das stärkste Wachstum wird in China, Indien und dem gesamten ostasiatischen Raum erwartet. Die 2,8 Milliarden der 2011

transportierten Passagiere entsprechen einem Drittel der Weltbevölkerung. Fliegen ist daher für viele Menschen in den wohlhabenden Staaten heutzutage eine Selbstverständlichkeit und kein Privileg mehr. Tatsächlich wird aber der Anteil der Weltbevölkerung, der je geflogen ist, von kritischen Stimmen auf nur 5 % geschätzt (ATMOSFAIR 2013). Hier offenbart sich auch im Flugverkehr die Disparität des weltweiten Wohlstandes. In Deutschland sind interessanterweise 20 % aller Bürger noch nie geflogen (RP-ONLINE 2008).

Den positiven ökonomischen Perspektiven steht allerdings auch eine Reihe von Problemen gegenüber. So ist der wachsende internationale Luftverkehr ohne eine angemessene Flughafeninfrastruktur nicht funktionsfähig. In vielen Metropolen der Welt aber reichen die Kapazitäten der Flughäfen heute nicht mehr aus. Abschätzungen von EUROCONTROL (2008) zeigen, dass im Jahr 2030 0,5 bis 5 Millionen Flüge wegen fehlender Infrastruktur nicht durchgeführt werden können. Andere Stimmen (WILKERSON et al. 2010) sprechen sogar schon von 31 Millionen in 2006 nicht durchgeführter Flüge (siehe Beitrag von H. Pümpel in diesem Heft: „Die Flugmeteorologie als Modell internationaler Zusammenarbeit“).

Neben den Flughäfen als Nadelöhre des Flugverkehrs ist aber auch die jetzige Luftraumstruktur in die Kritik geraten. Historisch bedingt, aber auch aus organisatorischen und sicherheitsrelevanten Gründen, hat sich in Europa und im Gegensatz zu den Vereinigten Staaten eine regionale, da nationale Luftraumstruktur mit Luftverkehrsstraßen herausgebildet. Der europäische Luftraum ist mit über 33 000 Flügen an Spitzentagen mit der verkehrsreichste global. Die Einengung des Verkehrs auf Luftstraßen und zu viele Zuständigkeiten in der Luftraumüberwachung verdeutlichen den Reformbedarf. Die *Single European Sky*-Initiative der EU und das darauf aufbauende SESAR-Forschungsprogramm haben eine Restrukturierung des europäischen Luftraums zum Ziel, um die Effizienz des Luftverkehrsmanagementsystems insgesamt zu verbessern (siehe Beitrag von M. Kerschbaum: „Wetter im Luftverkehrsmanagement“). Ein wesentliches Element dabei ist das *Free Flight*-Konzept, womit man durch kürzere Flugzeiten auch hofft, den Hauptkostenfaktor Treibstoff reduzieren zu können (SESAR 2013; Beitrag von S. Koos: „Der Single European Sky und das Wetter“).

Als weitere nicht mehr zu unterschätzende äußere Kraft auf den Flugverkehr sind Klimaschutz und Umweltbelastung zu nennen (siehe Beitrag von R. Sausen und S. Matthes: „Einfluss des Flugverkehrs auf das Klima“). Gehen wie bei der CO<sub>2</sub>-Reduktion bei der Kostenreduktion wirtschaftliche und umweltbezogene Aspekte gleichermaßen einher, so sieht dies bei dem Umweltfaktor Lärm anders aus. Aus rein wirtschaftlichen Gründen wären hier beispielsweise uneingeschränkte nächtliche Starts und Landungen wünschenswert, was dem Ruhebedürfnis und der Gesundheit der Flughafenanwohner jedoch diametral entgegensteht. Damit wird der Beitrag der Flughäfen als ein Luftverkehr begrenzender Faktor weiterhin zunehmen.

Neben unzulänglicher Infrastruktur ist die zunehmende Komplexität organisatorischer und betrieblicher Abläufe ein weiteres, das Wachstum behinderndes Phänomen im Luftverkehr. Der Flugverkehr ist zu einem hochgradig vernetzten und komplexen System geworden. Die Durchführung eines einzelnen Fluges hängt immer mehr von anderen kontrollierenden Faktoren ab als von den Entscheidungen der verantwortlichen Piloten. Nicht allein bei An- und Abflügen auf einen Flughafen, auch während des Streckenflugs beeinflussen sich die Flugzeuge im immer dichter werdenden Luftraum gegenseitig. Sicherheitsabstände schrumpfen und machen neue Steuerungssysteme und erweiterte Funktionen der Flugsicherungen notwendig. Die Komplexität des vernetzten Systems beschränkt sich nicht auf einen Flug allein. Verspätungen eines einzelnen Flugzeuges können durch umsteigende Passagiere, durch Be- und Entladungsvorgänge mit Gepäck, fehlende Parkpositionen und andere Engpässe im Bodenverkehr zu Startverzögerungen und damit verbundenem Slotverlust an einem weit entfernten Flughafen auftreten. Diese Entwicklung stärkt die Auffassung, den Flugverkehr zunehmend als ein Gesamtsystem zu betrachten und die gegenwärtigen technischen und organisatorischen Entwicklungsprojekte des Flugverkehrs wer-

den konsequenterweise zunehmend unter Systemaspekten durchgeführt. Die beiden Programme NEXTGEN in USA und SESAR in Europa verdeutlichen dies. Zentrale Elemente beider Programme sind die Flugtrajektorien eines jeden geplanten Fluges. Unter Trajektorie versteht man dabei die geplante 3 D-Flugbahn als Funktion der Zeit, ein vierdimensionales Element also. Die konfliktfreie und flugplankonforme Konstruktion der 4 D-Trajektorien und letztendlich auch die plangemäße Durchführung eben dieser Trajektorie ist damit die zentrale Aufgabe des Systems Flugverkehr.

Im Flugverkehr ist das Wetter häufig ein lokal aber auch großräumig auftretender Störfaktor. Die Minimierung der wetterbedingten Beeinflussung der 4 D-Trajektorien wird eine wichtige und kritisch zu bewertende Aufgabe in SESAR als auch NEXTGEN werden, da das Wetter gemäß der üblichen Luftfahrtterminologie nicht kooperativ ist und seine raum-zeitliche Entwicklung eine inhärente chaotische und nicht vorhersagbare Komponente aufweist (siehe Beitrag von M. Sauer und T. Gerz: „Wettereinfluss auf Sicherheit und Effizienz im Luftverkehr – Analysen und Minimierungskonzepte“).

Waren noch vor zehn Jahren laut Statistik der DFS an den deutschen Flughäfen hauptsächlich technische, organisatorische Verspätungsgründe maßgebend, so ist es heute hauptsächlich das Wetter. So wurden 45 % der Abflugverspätungen auf dem Flughafen Frankfurt/Main im Jahr 2010 durch das Wetter verursacht (EUROCONTROL 2013). Konnten durch Infrastrukturmaßnahmen die ersteren Gründe minimiert werden, so rückten im gleichen Maße die nicht beeinflussbaren Wetterfaktoren in den Vordergrund. Wetterbedingte Verspätungen entstehen nicht allein durch unwetterartige Erscheinungen wie Starkgewitter, Sturmtiefs oder massive Wintereinbrüche, sondern auch durch bereits weniger ausgeprägte Wetterphänomene (vereinzelter Blitzschlag, wenige Zentimeter Schnee, tiefer Stratus, wechselnde Windverhältnisse, schlechte Sichtweiten). Diese erwachsen dennoch zu beträchtlichen Störgrößen für Lufträume oder Flughäfen, sofern letztere am Rande ihrer Kapazität arbeiten. Wetterbedingte Einbußen der stündlichen Kapazität an europäischen Flughäfen liegen bei 15 % bis 45 % (EUROCONTROL 2005). Mit zunehmender Entwicklung des Flugverkehrs ohne parallel einhergehende Kapazitätserweiterungen werden daher auch bereits suboptimale Wetterbedingungen zunehmenden Einfluss auf die Luftverkehrsindustrie und luftfahrtabhängigen Tourismus nehmen.

Zunehmende Vernetzung organisatorischer Abläufe, wirtschaftliches Wachstum und erhöhte Anforderungen durch Umwelt- und Klimaschutzauflagen, an Effizienz und auch an Sicherheit stellen auch an die Flugmeteorologie international wachsende Anforderungen. Die meteorologische Betreuung der Luftfahrt hat zu einem Innovationsschub in verschiedenen wissenschaftlichen und technischen Bereichen geführt, da konventionelle Produkte nicht mehr den Kundenerwartungen entsprechen (siehe Beitrag von K. Sievers: „Wetterinformatio-

nen für Piloten: ein Erfahrungsbericht aus der Praxis“). Forschungsinstitute, Wetterdienste und Industrie in wirtschaftlich starken Regionen der Erde arbeiten in diversen Projekten an einer zukunftsfähigen meteorologischen Versorgung der Luftfahrt zusammen. Diese Entwicklung spiegelt sich auch in den verschiedenen Beiträgen dieses Heftes.

Da wir das Wetter nicht ändern können, müssen wir mit dem Wetter leben (ACARE 2001). Diese Einsicht aus dem Kreise der Luftfahrtindustrie ist auch das Credo flugmeteorologischer Forschung und Entwicklung, die Wirkung des den Flugverkehr störenden Wetters zu minimieren. Die zentralen Aufgaben sind:

1. die möglichst umfassende, zeitnahe und akkurate Diagnose und Prognose störenden Wetters und
2. die rechtzeitige Einbindung dieser Informationen in die Entscheidungsprozesse der Luftverkehrssteuerung.

Mit der Wachstumsprognose der Luftfahrtindustrie und der im Vergleich schwächeren Kapazitätserweiterung von Streckennetz und Flughafeninfrastruktur sind es vor allem diese Entscheidungsprozesse im Flugbetrieb und Flughafenbetrieb sowie in der Verkehrssteuerung, die hinsichtlich meteorologischer Information ein Verbesserungspotential aufweisen.

Welche Rolle spielt die Flugmeteorologie im Spannungsfeld Flugverkehr zwischen Umwelt und Klima, Ökonomie und Sicherheit (Abb. 1-1)? Dies wird im Artikel von H. Pümpel: „Die Flugmeteorologie als Modell internationaler Zusammenarbeit“ aus Sicht der WMO dargestellt und soll auch im nächsten Kapitel behandelt werden. Offensichtlich betreffen die Flugmeteorologie alle drei in Abb. 1-1 gezeigten Kräfte. Die Flugmeteorologie wird:

1. durch meteorologische Informationen eine bezüglich des Wetters konfliktfreie Flugplanung und -durchführung ermöglichen, Verspätungen reduzieren und die Wirtschaftlichkeit des Flugverkehrs erhöhen. Dazu muss der Einfluss des Wetters auf Sicherheit und Effizienz diagnostiziert und prognostiziert werden, und dieses Wissen in die Flugplanung und das gesamte *Air Traffic Management* mit einbezogen werden,
2. die Umwelt- und Klimabelastung reduzieren und gleichzeitig
3. den Schutz des Luftverkehrs vor Wettergefahren weiter erhöhen.

Die Aufgaben sind damit etwas abstrakter formuliert:

1. Daten bereitstellen,
2. Daten kommunizieren,
3. Datenanwendungen entwickeln.

(siehe <http://www.eurocontrol.int/services/aviation-meteorology>).

Die Luftverkehrsindustrie sieht sich, wie andere Massenverkehrssysteme auch, im Spannungsfeld zwischen ökologischen und ökonomischen Interessen (Abb.1-1). Der moderne Mensch von heute möchte fliegen und vom Nutzen des globalen Flugverkehrs profitieren, er möchte aber andererseits von den negativen Begleiterscheinungen verschont bleiben. Die zur Lösung dieser Problematik nötige Förderung des sich weiter entwickelnden Luftverkehrs hinsichtlich Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit ist zu einem zentralen Anliegen der Öffentlichkeit, der Wirtschaft und der Staaten geworden. Forschungsinstitute und Wetterdienste leisten hierzu einen wichtigen Beitrag.

## 2 Wetter und Flugverkehr

Zentrale Aufgabe des öffentlichen Flugverkehrs ist der kommerzielle Transport von Passagieren und Frachtgut über weite Strecken. Zu diesem meist internationalen Verkehr kommen allerdings noch der militärische Flugverkehr (siehe Beitrag von D. Daniel et al.: „Geoinformationsberatung in Einsatzgebieten der Bundeswehr“) und die allgemeine Luftfahrt hinzu, sowie ein meist privat orientierter Sportverkehr wie Segelflug, Drachenflug, Gleitschirmspringen etc. Auch diese Luftfahrzeuge und -geräte stellen spezielle Anforderungen an die Flugmeteorologie und an eine angemessene Versorgung mit meteorologischen Informationen. Nicht umsonst haben sich alle Art von Piloten vor Flugantritt über die meteorologischen Bedingungen während des Fluges zu unterrichten (siehe Beitrag von M. Streicher: „Fallstudie eines wetterbedingten Flugunfalls“). Sicherheit geht vor. Lufträume mit gefährdendem Wetter, wie Gewitter, sind zu meiden, was zu Umwegen und letztlich zusätzlichen Kosten führt. Den Start verhindernde Sichtbedingungen sind bis zu ihrer Besserung abzuwarten, für landende Flugzeuge ist bei zu geringen Sichtweiten

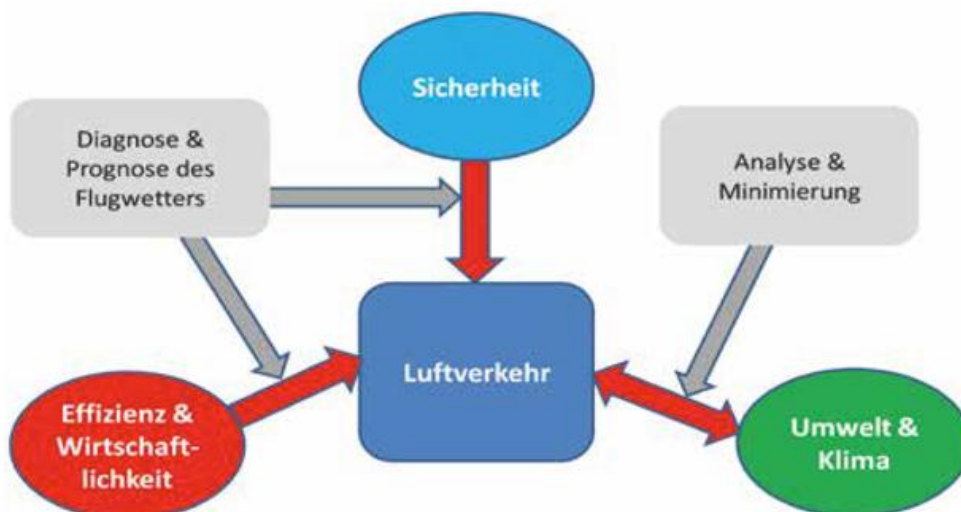


Abb. 1-1: Der Flugverkehr im Spannungsfeld dreier Kräfte und der Beitrag der Flugmeteorologie.

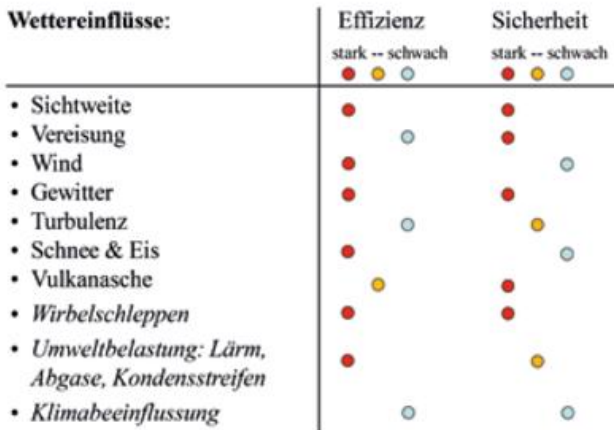


Abb. 1-2: Qualitative Wichtung der verschiedenen wichtigsten Wetterphänomene in ihrer Auswirkung auf Sicherheit und Effizienz. Damit soll die unterschiedliche Bedeutung der einzelnen Wetterphänomene verdeutlicht werden. In Kursiv dargestellt sind die Einflüsse des Luftverkehrs auf Verkehr und Umwelt selbst.

ein Ausweichflughafen anzusteuern (siehe Beitrag von R. Steinacker und S. Umdasch: „Die meteorologische Sichtweite“). Schnee auf den Verkehrswegen erlaubt weder Starts noch Landungen und muss erst mit zum Teil erheblichem Aufwand geräumt werden (siehe Beitrag von K. Roloff et al: „Winterwetteroperationen am Beispiel Flughafen Frankfurt“). Die Beispiele zeigen klar, dass die Einhaltung von Sicherheitsstandards zusätzliche Kosten zur Folge hat. Wetter beeinflusst daher Sicherheit und Effizienz des Flugverkehrs. Zumeist sind dies negative Auswirkungen. Ausnahme hier ist der Gegenwind en route, der zwar in der Regel kein Sicherheitsrisiko darstellt, aber zu Verspätungen führen kann. Und der Rückenwind, der zu einer reduzierten Flugzeit führt und damit als ein echter positiver Wettereinfluss zählt.

Die wichtigsten Wetterphänomene sind von den angegebenen Autoren in den beiden PROMET Heften zur Flugmeteorologie ausführlich behandelt (Tab. 1-1). Herauszuheben ist dabei natürlich auch die umgekehrte Wirkungsrichtung des Flugverkehrs auf die Atmosphäre, insbesondere auf Wetter und Klima, wie er im Beitrag: „Einfluss des Flugverkehrs auf das Klima“ von R. Sausen und S. Matthes zu-

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Sichtweite                | R. Steinacker und S. Umdasch               |
| Vereisung                 | K. Roloff et al.                           |
| Schwerewellen und Rotoren | D. Etling und R. Heise                     |
| Turbulenz                 | M. Raschendorfer und A. Barleben           |
| Gewitter                  | C. Forster et al.                          |
| Vulkanasche               | B. Weinzierl und A. Diehl                  |
| Vogelschlag               | W. Ruhe                                    |
| Winterwetter              | Roloff et al.;<br>F. Keis und A. Tafferner |
| Wirbelschleppen           | F. Holzäpfel                               |

Tabelle 1-1: Die wichtigsten Wetterphänomene in der Flugmeteorologie und ihre Beschreibung durch die angegebenen Autoren der beiden Promet-Hefte.

sammengefasst ist. Zu kommenden flugmeteorologischen Aufgaben wird sicherlich auch das klima- und umweltoptimierte Fliegen gehören (MATTHES et al. 2012).

### 2.1 Flugmeteorologie und Sicherheit

Was sind die Handlungsoptionen, um den Wettereinfluss auf das absolute Minimum zu senken? Und wie sichert man sich vor schlechtem Wetter?

Dieser Aufgabe sehen sich Flugzeughersteller gegenüber, die nach internationalen Standards Flugzeuge so zu bauen und auszurüsten haben, dass ein Flug durch die genannten Wetterphänomene sicher durchgeführt werden kann. Dies geschieht nach internationalen Standards im Rahmen von Zulassungsverfahren, zum Beispiel durch die amerikanische Aufsichtsbehörde FAA oder die europäische EASA. Hierbei werden die Wettergefahren, vereinfacht gesagt, kategorisiert und Flugzeuge entsprechend ihrem Leistungsvermögen für bestimmte Wetterkategorien, wie zum Beispiel maximalem Seitenwind zugelassen. Eine allgemeine Wettertauglichkeit und Zulassung für alle Wettergefahren, so wünschenswert dies auch sei, ist jedoch nicht möglich. Dies zeigen einfache Überlegungen, beispielsweise zum Schutz vor Hagelschlag beim Durchflug durch ein Gewitter. Eine entsprechende Armierung wäre zwar im Prinzip möglich, wie die Hurrikan-Forschungsflugzeuge der NOAA belegen, wäre aber für normale Flugzeuge zu schwer und zu teuer.

Es bleibt daher nur die Schutzmaßnahme „Erkennung und Vermeidung“, die zur zentralen meteorologischen Aufgabe im gesamten Komplex der Risikominderung und Effizienzsteigerung führt.

In Deutschland wurde schon im Jahre 1911 mit dem Aufbau eines Luftfahrerwarndienstes begonnen, der genau diese Zielsetzung verfolgte: die Erkennung von den Luftverkehr gefährdendem Wetter und der Warnung vor demselben in geeigneter Form, sodass Pilot und Fluggesellschaften die gefährdeten Lufträume vermeiden können (siehe dazu die Pressemeldung <http://www.airliners.de/messen-ohne-ende/24365>). An dieser Kernaufgabe

hat sich seitdem nichts geändert. Im Laufe der Zeit wurden entsprechend den zur Verfügung stehenden Wetterinformationen, durch Satellit, Radar, Pilotenmeldungen, SYNOP-Meldungen, Modellvorhersagen etc. gemäß Richtlinien und Qualitätsvorgaben der WMO eine Reihe von spezifischen Diagnose- und Warnprodukten erstellt. In diesen beiden PROMET-Heften wird ein Überblick über die beim Deutschen Wetterdienst vorhandenen Produkte gegeben. Im Artikel „Wetterinformationen für Piloten: ein Erfahrungsbericht aus der Praxis“ wird von dem Piloten K. Sievers dargestellt, wie und in welchem Umfange auf diese Produkte zugegriffen wird. Gleichzeitig verdeutlicht dieser Artikel aber auch, dass die von ICAO und WMO vereinbarten Standardproduk-

te den heutigen Anforderungen des Luftverkehrs nicht mehr genügen. Dafür sind mehrere Gründe maßgeblich:

- a. Standardprodukte sind sehr textorientiert oder mit Grafiken in eher schlichtem Design versehen. Die vielfältigen Möglichkeiten moderner, farbiger, interaktiver und ggf. auch animierter Grafik werden nicht genutzt. Der in dieser Hinsicht heute verwöhnte Nutzer mag sich nicht mehr durch viele Seiten Textinformation durcharbeiten. Von Wetterdiensten, wenn überhaupt noch, bereitgestellte Textinformation werden von Piloten bei ihrer Flugvorbereitung in vielen Fällen kaum noch genutzt. Rein textbasierte Meldungen haben jedoch den Vorteil geringen Datenumfanges und können daher während des Fluges ohne Probleme empfangen werden, während die Grafiken mangels Standardisierung oder Dateigröße wegen fehlender Übertragungswege oder -kapazitäten ungenutzt bleiben.
- b. Die heutigen Kommunikationsmöglichkeiten, mit zum Teil Internetanschluss im Flugzeug und mehr Wetterinformationen auch im Cockpit, lassen im Prinzip eine aktualisierte und zeitnahe Wetterinformation für Piloten und Fluglotsen zu, sofern entsprechende Produkte und Verfahren entwickelt sind. Standardprodukte sind, wenn sie im Flug zum Einsatz kommen, mehrere Stunden alt und in ihrer Aussagekraft von daher entsprechend überholt. Die Wetterdienste am Boden verfügen dabei über neuere Informationen, können diese aber dem Nutzer leider nicht zukommen lassen.
- c. Eine umfassende und zutreffende Beurteilung einer aktuellen Wettersituation zur Gefahrenvermeidung aber auch zur Effizienzerhöhung ist heutzutage durch eine Synopse aller vorhandenen Wetterbeobachtungssysteme in einem viel besseren Maße als früher ohne diese Quellen möglich. Dazu müssen vorhandene Informationsquellen wie Modelloutput, Satellitendaten, SYNOP-Daten, Radiosonden etc. integriert dargestellt werden und die für den Piloten relevante Information entsprechend ihrer Bedeutung vermittelt werden. Das an mehreren US-amerikanischen Flughäfen installierte *Integrated Terminal Weather System* (ITWS) und die ersten ähnlichen Entwicklungen (siehe Beitrag von M. Sauer und T. Gerz: „Wettereinfluss auf Sicherheit und Effizienz im Luftverkehr – Analysen und Minimierungskonzepte“) weisen in diese Richtung (ROBINSON et al. 2004). Hinsichtlich des Nutzens muss jedoch zwischen Nutzern am Boden wie *Air Traffic Controller* (ATC), *Air Traffic Management* (ATM), Flughafenbetreibern einerseits und Piloten andererseits unterschieden werden, ebenso zwischen dem Sicherheits- und dem Effizienzeffekt. Der DWD installiert und testet gegenwärtig ITWS-Systeme an den Flughäfen Frankfurt und München. Systeme wie ITWS werden dabei auch von neuen und verbesserten Messsystemen profitieren: Polarisationsradar für Niederschlagsklassifikation, Satellitenprodukte für Gewitterentwicklung, Aerosol-Lidar für Vulkanasche, Windprofiler für Winde im Anflugbereich sind hier exemplarisch zu nennen.

d. Es gibt einen zunehmenden Bedarf an Wetterprodukten, die maßgeschneidert für operationelle Entscheidungsabläufe sind. Beispiele dafür sind:

- Kontinuierliche Schneefallvorhersagen mit Wahrscheinlichkeitsangabe für den Winterdienst an einem Flughafen (siehe Beitrag von F. Keis und A. Tafferner: „Nowcasting von Winterwetter am Flughafen München“),
- Querwinddiagnose und Kurzfristprognose des Querwindes im Landeanflug für die Wirbelschleppenausbreitungsmodellierung und damit die Anflugstaffelung,
- zeitnahe Frontenverlagerung für Anflugrichtungsänderung an einem Flughafen,
- zeitoptimiertes Durchfliegen eines Gewittergebietes,
- Prognose der Sektorbelastung der Flugsicherung als Resultat des Ausweichverhaltens vor Schlechtwettergebieten,
- in Zukunft mit SESAR simultane Trajektorienkoordination in Schlechtwettergebieten.

Weiterer Bedarf ist im Beitrag von M. Kerschbaum: „Wetter im Luftverkehrsmanagement“ zu finden. Die Zielrichtung ist dort natürlich die Unterstützung operationeller Entscheidungen. Aber in dem Maße, wie diese neuen Werkzeuge eingeführt sind, dienen sie automatisch natürlich auch der Sicherheit. Dass die Standardprodukte diesen Anforderungen nicht mehr genügen, ist offensichtlich.

Es gibt -zusammenfassend- einen Bedarf für zeitlich und räumlich hochauflösende umfassende aktuelle Wetterinformationen, die maßgeschneidert an die Anforderungen der Nutzer sind und diesen schnell zur Verfügung gestellt werden. Das Vereisungsdiagnose- und -warnsystem ADWICE des DWD ist ein solches spezifisches Produkt (siehe Beitrag von Roloff et al.: „Flugzeugvereisung“).

Die aktuelle und kommende Aufgabe der Flugmeteorologie ist es, diese neuen Produkte zu entwickeln und zusätzlich zu den klassischen zur Verfügung zu stellen (siehe Beitrag von M. Riediger: „Meteorologische Informationen für die Flugdurchführung“). Dabei wird es aus Personal- und Kostengründen zwangsweise zu einer internationalen Arbeitsteilung kommen. Erwähnt werden sollte, dass über die von den Fluggesellschaften zu errichtenden Gebühren für die Verkehrsinfrastruktur auch die Flugmeteorologie - Betrieb und Forschung - mitfinanziert wird. Hauptmotoren neuerer Entwicklungen sind zum einen die USA und zum anderen die Europäische Union. Im Rahmen von F&E-Vorhaben wurden so zum Beispiel in den USA seit den 80er Jahren systematisch neue flugmeteorologische Produkte eingeführt, wie zum Beispiel die Vereisungsdiagnose- und -warnverfahren CIP/FIP (NCAR, Boulder/Colorado), das *Graphical Turbulence Guidance*-Produkt (NOAA 2013), außerdem eine Reihe von Entwicklungen des Lincoln Lab für ATC. In Europa sind ähnliche Entwicklungen meist von einzelnen Wetterdiensten und/oder Wissenschaftlern getragen worden, wie zum Beispiel das Vereisungsprodukt

SIGMA von METEO FRANCE oder das schon genannte ADWICE des DWD. Letzteres ist aus einer Zusammenarbeit mit dem DLR und der Leibniz-Universität Hannover entstanden (TAFFERNER et al. 2003). Von der EU geförderte Projekte wie EURICE, WEZARD und FLYSAFE haben in einzelnen Bereichen substantielle Impulse gegeben. So wurde in FLYSAFE erstmals „Wetter“ neben „Terrain“ und „Verkehr“ als gleichwertige Gefahr des Flugverkehrs untersucht und Methoden demonstriert, wie das Gefahrenbewusstsein des Piloten durch gleichzeitige und adäquate Präsentation dieser Gefahren im Cockpit, an der Mensch-Maschine-Schnittstelle, substantiell und nachweislich verbessert werden kann. Weitergehende Förderung koordinierter Entwicklung neuer flugmeteorologischer Produkte ist von dem SESAR-Projekt zu erwarten. Träger flugmeteorologischer Forschung in Deutschland sind im Wesentlichen der Deutsche Wetterdienst und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR, in Kooperation mit einzelnen Universitäten wie Hannover, Bonn, Wien und weiteren Partnern der Luftfahrtindustrie.

## 2.2 Wetter und Effizienz

Wie kann man den Flugverkehr effizienter machen? Wettergefahren erzwingen Sicherheitsvorkehrungen, die wiederum zu Verspätungen und/oder Umwegen führen und damit Kosten verursachen.

Einige Zahlen zum Beispiel: Die wetterbedingten Verspätungen belaufen sich auf mehrere Milliarden US\$ in den USA und in Europa auf etwa 1 Milliarde € jährlich (DOLL 2010; EUROCONTROL 2009, 2011). Die Hälfte der Verspätungen am Flughafen und im Flughafennahbereich wurden 2012 durch Wetter verursacht (EUROCONTROL 2013). Weitere Zahlen in den einzelnen Fachbeiträgen.

Präziser gestellt muss die Frage lauten: Wie kann man den Flugverkehr effizienter machen, ohne dass die Sicherheit darunter leidet? Der scheinbare Widerspruch zwischen einerseits „mit dem Wetter leben“ und der Unveränderlichkeit des Wetters und dem Anspruch, andererseits, den Wettereinfluss ohne Sicherheitsverlust zu reduzieren, wird aufgelöst durch die Erkenntnis, dass nur die umfassende Betrachtung des Wettergeschehens es erlaubt, impaktminimierte Lösungen zu finden. Man muss daher ein möglichst räumlich hochaufgelöstes Bild des Wetters, seiner zeitlichen Entwicklung und der Gefährdungsstärke bekommen. Dient dieses Bild hinsichtlich des Sicherheitsaspekts dazu, gefährliche Lufträume zu vermeiden, so hilft es jetzt hinsichtlich der Effizienz, möglichst kurze aber sichere Umwege zu identifizieren. Damit aber auch eine Kostenreduktion insgesamt verbunden ist, müssen die so gewonnenen Lösungen zeitnah und in enger Abstimmung mit dem Luftverkehrsmanagement umgesetzt werden.

Eine umfassende Erkenntnis erlangt man beispielsweise durch ein ITWS oder ähnliche Systeme. Rechnet man die in der Literatur genannten Einsparungen durch das CWIS in den USA von 125 bis 250 Millionen \$ um (ROBINSON

et al. 2004), so erhält man eine mögliche Reduktion der wetterbedingten Kosten um 10 bis 40 %. Die Investitionskosten hätten sich jedenfalls in kürzester Zeit amortisiert. Die oben genannten Entwicklungen wie ITWS, Wetter im Cockpit aber auch Flugverkehrssimulationen unter Schlechtwettereinfluss, die spezifischen auf operationelle Entscheidungen hin entwickelten Produkte wie Nebelvorhersage, Schneefallvorhersage, Frontenverlagerungsprognose etc. dienen alle einerseits der Sicherheitsverbesserung, andererseits aber auch einer effizienteren Flugsystemplanung und -steuerung.

## 3 Aerologie und Flugzeuge als Messsysteme

Dienten die ersten Flüge mit den Montgolfieren noch dem reinen Flugvergnügen, so zeigte doch bald die aerologische Forschung ein hohes Interesse an allen Fluggeräten, seien es Drachen, Zeppeline, Ballons. Alles mit dem Ziel, die dritte Dimension der Atmosphäre zu erkunden und zu verstehen. Die Aerologie war geboren. In dem Maße allerdings wie zunächst Radiosonden und dann Fernerkundungsverfahren und Satelliten die Atmosphäre überwachten und erkundeten, verlor der Begriff Aerologie an Bedeutung. Ende des 20. Jahrhunderts zeichnet sich aber eine Trendwende ab. Programme wie ACARS und AMDAR machten sich in zunehmendem Maße Flugzeuge als Messträger zunutze. Die sowieso vorhandene Datenkommunikation zwischen Flugzeug und Bodenstation der Fluggesellschaft wurde und wird genutzt um Temperatur- und Windinformation längs des Flugweges zu übertragen. Bei etwa 23 000 Verkehrsflugzeugen weltweit, wobei allerdings nicht alle in die beiden Messprogramme integriert sind, erhalten die Wetterdienste weltweit etwa 300 000 Messwerte täglich (siehe Beitrag von A. Hoff et al: „Verkehrsflugzeuge als meteorologische Beobachtungssysteme“). Diese Messwerte werden ähnlich wie Radiosondenaufstiege behandelt und von den numerischen Wettervorhersagemodellen assimiliert. Hinzu kommen noch speziell auf Wunsch der Wetterdienste installierte und auch von diesen bezahlte Feuchtesensoren hinzu und in nahe Zukunft auch Informationen über Vereisung.

Eine weitere Unterstützung aerologischer Messungen wird in Bälde von unbemannten Flugkörpern (UAV), im militärischen Sprachgebrauch auch Drohnen genannt (siehe Beitrag von T. Prenosil: „Konzept zur meteorologischen Einsatzunterstützung für die Aufklärungsdrohne Heron 1“) kommen. Hier werden es vor allem spezifisch für atmosphärische Messungen ausgelegte Messflugzeuge sein, die etwa mehrere Tage lang kontinuierlich meridionale stratosphärische Traversen von Pol zu Pol fliegen um Temperatur, Wind, Ozon und andere Spurenstoffe zu messen. Die Entwicklung steht hier erst am Anfang.

Der Artikel zur Vulkanasche weist auf eine weitere Entwicklung hin. So wie beim Eyjafjallajökül das deutsche Messflugzeug Falcon der DLR für Aschekonzentrationsmessungen eingesetzt wurde (siehe Beitrag von B. Wein-

zierl und A. Diehl: „Vulkanasche und Vorhersage“), so hält nunmehr der DWD in Zusammenarbeit mit der FH Düsseldorf (Prof. Weber) ein solches Überwachungsflugzeug für künftige Einsätze bereit. Das Messflugzeug ist mit mehreren Sensoren bestückt, und liefert die benötigten Messungen von Vulkanasche und anderen Tracern in nahe Echtzeit.

Man sieht, die Aerologie ist nach wie vor aktuell und hat mit den Insitu-Messungen durch Flugzeuge neuen Auftrieb erhalten.

#### 4 Zusammenfassung

Die operationelle Flugmeteorologie mit neu zu entwickelnden bedarfsorientierten und maßgeschneiderten Produkten ist ein wichtiger und unverzichtbarer Bestandteil des Systems „Flugverkehr“, indem sie zu Sicherheit und Effizienz beiträgt und den Flugverkehr der Zukunft noch sicherer macht, als er heute schon ist. Um den Anforderungen der Zukunft gerecht zu werden, ist eine neue flugmeteorologische Forschung erforderlich, so wie sie in diesem Heft in einigen Artikeln auch schon vorgestellt wurde (siehe auch SCHUMANN 2012). Nicht alle Themengebiete konnten allerdings in den beiden Heften dargelegt werden. So die Querwindproblematik, der Blitzschlag, die Runway-Nässe, die Lärmbelastung durch den Flugverkehr aber auch und insbesondere der systemische Aspekt, die globale Vernetzung und die Verkehrssimulationsverfahren wären hier noch zu nennen.

Die Flugmeteorologie steht auch deshalb in einem Umbruch, da die gängigen Verfahren nicht mehr ausreichend für den kommenden Flugverkehr sind. Das Wissen darum ist in der meteorologischen Gemeinschaft vorhanden, diese Erkenntnis setzt sich bei den anderen Partnern im Luftverkehr, Flughäfen, Fluggesellschaften und Hersteller jedoch nur zögerlich durch. Das alles hemmende Kostenproblem muss gelöst werden, um die nötige Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten.

Die Meteorologen können dabei aber sicher sein, ohne gewaltige Anstrengungen und damit auch finanzielle Mittel werden Ziele, wie die etwa von SESAR formulierte 1 Minute Ankunftsgenauigkeit, nicht zu erreichen sein. Die Meteorologen sind bereit für diese Aufgaben, wie auch die Forschungsbeiträge in diesem Heft zeigen.

#### Literatur

ACARE, 2001: European Aeronautics: A vision for 2020. Meeting society's needs and winning global leadership. Report of the group of personalities. [http://www.acare4europe.org/sites/acare4europe.org/files/document/Vision%202020\\_0.pdf](http://www.acare4europe.org/sites/acare4europe.org/files/document/Vision%202020_0.pdf)

ATMOSFAIR, 2013: Who flies? Who pays? <https://www.atmosfair.de/en/air-travel-and-climate/who-flies-who-pays/>

DOLL, C., 2010: The vulnerability of transport systems towards Weather Extremes. Summary Report of the WEATHER Workshop 1, Brussels, 14. September 2010. Research project WEATHER (Weather Extremes: Impacts on Transport Systems and Hazards for European Regions) funded under the 7th framework program of the European Commission. *Fraunhofer-ISI*, Karlsruhe.

EUROCONTROL, 2005: Report on Punctuality Drivers at Major European Airports. *Performance Review Unit, May 2005*.

EUROCONTROL, 2008: Challenges of Growth 2008. Summary report. Brussels.

EUROCONTROL, 2009: Aviation Meteorology (MET) Workshop 1, 27-28th May 2009, MET support to ATM. *European Organisation for the Safety of Air Navigation, Brussels*.

EUROCONTROL, 2011: European airline delay cost reference values. Final Report (Version 3.2). Department of Transport Studies University of Westminster, London. Contract 09-112277-C.

EUROCONTROL, 2013: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/154931/umfrage/gruende-fuer-abflugverspaetungen-auf-ausgewaehlten-flughaeften-in-europa/>

MATTHES, S., SCHUMANN, U., GREWE, V., FRÖMMING, C., DAHLMANN, K., KOCH, A., MANNSTEIN, H., 2012: Climate optimized air transport. In: Atmospheric Physics: Background - Methods - Trends Research Topics in Aerospace. *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, 727-746.

NOAA, 2013: <http://aviationweather.gov/exp/gtg/info.php>.

ROBINSON, M., EVANS, J., CROWE, B., KLINGLEWILSON, D., ALLAN, S., 2004: Corridor Integrated Weather System (CIWS) Operational Benefits 2002-2003: Initial Estimates of Convective Weather Delay Reduction. Project Report ATC-313. *MIT Lincoln Laboratory*, Lexington, MA.

RP-ONLINE, 2008: <http://www.rp-online.de/leben/reisen/news/viele-deutsche-haben-flugangst-aid-1.2415196>.

SCHUMANN, U. (Ed.), 2012: Atmospheric Physics, Background - Methods - Trends. *Springer*, 870 pp.

SESAR, 2013: <http://www.sesarju.eu/about/background>.

TAFFERNER, A., HAUF, T., LEIFELD, C., HAFNER, T., LEYKAUF, H., VOIGT, U., 2003: ADWICE – Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environments. *Wea. Forecast.* **18**, 184-203.

WILKERSON, J. T., JACOBSON, M.Z., MALWITZ, A., BALASUBRAMANIAN, S., WAYSON, R., FLEMING, G., NAIMAN, A.D., LELE, S.K., 2010: Analysis of emission data from global commercial aviation: 2004 and 2006. *Atmos. Chem. Phys.* **10**, 6391-6408, doi:10.5194/acp-10-6391-2010.

WORLD BANK, 2012: World Bank Group Air Transport Fiscal Year 2012, Annual Report.

H. PÜMPEL

## 2 Die Flugmeteorologie als Modell internationaler Zusammenarbeit

Weather and Air Traffic Management

### Zusammenfassung

Der Artikel bietet einen Überblick über die historische Entwicklung der internationalen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Flugmeteorologie, gefolgt von einer Beschreibung der Verantwortlichkeiten für die wichtigsten Arbeitsbereiche. Es werden die Komponenten des **World Area Forecasting Systems (WAFS)** der ICAO ebenso beschrieben wie die regionale Aufteilung der Warnungen für gefährliche Wettererscheinungen. Wir betrachten außerdem die Entwicklung vom Austausch traditioneller alphanumerischer Produkte (OPMET-Daten, wie etwa METAR oder TAF) hin zu einem netzwerkorientierten Aufbau von **Weather Exchange Models**. Diese Verfahren bedienen sich moderner und auf Industrie-Standards beruhender Formen wie XML oder GML, und werden damit auch kompatibel mit anderen datenaustauschsystemen der Luftfahrt sein. Sie bilden die Grundlage für neue Dienste für Air Traffic Management. Die Problematik der Ausbreitung von Vulkanasche sowie der Vorhersage von tropischen Wirbelstürmen, für die ein eigenes globales Vorhersagesystem basierend auf regionalen Vorhersagezentralen geschaffen wurde, ist ebenfalls Gegenstand des Beitrages.

### Summary

The contribution includes a short historical review of the development of international cooperation in the field of aeronautical meteorology, including a description of the distribution of responsibilities between the different national and international organizations in charge of these services. The components of the ICAO **World Area Forecasting System (WAFS)** will be described together with the regulations concerning the preparation and issuance of warnings and advisories on hazardous weather conditions. We will discuss the development of information provision from the traditional, alphanumeric codes for the legacy OPMET data such as METAR and TAF towards the new concepts of a network-based, data-oriented system of **Weather Exchange Models**, which will be based on the industry standard forms of data exchange XML and GML, and will ensure consistency with other aeronautical information exchange protocols. A further chapter is dedicated to the description of the meteorological support to new air traffic management systems on national and regional scales. The article concludes with a description of the information systems established to provide timely information on the transport and diffusion of volcanic ash and the forecast trajectories and intensity of tropical cyclones.

### 1 Historischer Rückblick

Die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Meteorologie nahm am ersten Weltkongress in Wien 1873 ihren Ausgang, bei der eine Konferenz der Direktoren der Wetterdienste als **International Meteorological Organization (IMO)** gegründet wurde. Schon im Jahre 1896 wurde die **Commission for Aeronautics** gemeinsam mit der **Strahlungskommission** gegründet – bis zum Erstflug der Gebrüder Wright und Kitty Hawk würden aber noch 7 Jahre vergehen ...

Auch dieser Erstflug wurde nach meteorologischen Kriterien ausgerichtet, der beständige Wind an der Küste war nach Auskunft des dortigen Wetterbeobachters ein verlässlicher Verbündeter für den mutigen Versuch der Flugpioniere. Schon bald wurde die **Commission for Aeronautics** zu einer zwischenstaatlichen Kommission, lange bevor aus der IMO im Jahre 1950 die **World Meteorological Organization (WMO)** als zwischenstaatliche Organisation gegründet wurde!

Eine historische Aufnahme zeigt die **Commission for Aeronautical Meteorology (CaEM)** (immer noch vor der Grün-



Abb. 2-1: Die Commission for Aeronautical Meteorology kurz nach dem 2. Weltkrieg (Fotoquelle: IMO Commission for Aeronautical

derung der WMO, aber nach der Unterzeichnung des Abkommens von Chicago, das 1944 die International Civil Aviation Organization ICAO begründete) in Canada (Abb. 2-1).

**1.1 Zusammenarbeit mit der Internationalen Zivilluftfahrt-Organisation ICAO**

Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO), deren Gründungsvereinbarung am 7. Dezember 1944, noch während des zweiten Weltkrieges, von 52 Staaten unterzeichnet wurde (Panama verlangte einen einschränkenden Passus, zwei weitere Staaten waren zur Unterschrift eingeladen, blieben diese aber schuldig) trat 1947 in Kraft, im Jahr der ersten Sitzung der Kommission für Luftfahrtmeteorologie.

Die ICAO wurde zum internationalen Regulator der Zivilluftfahrt und im Laufe ihrer nunmehr über 65-jährigen Geschichte entwickelte die Organisation ein detailliertes Regulativ für alle Aspekte der zivilen Luftfahrt, von der Verkehrslenkung zur Telekommunikation und von der Meteorologie bis zum Such- und Rettungsdienst.

Dieses Regulativ wurde in die inzwischen 18 Annexe zur Konvention, jeweils zu einem Themenkreis, zusammengefasst, und in einem dreijährigen Rhythmus den technologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen durch sogenannte Amendments angepasst. Der für die Luftfahrt-

meteorologie zuständige Annex 3 stellt somit das wesentliche Regulativ für die Erbringung meteorologischer Dienstleistungen an die zivile Luftfahrt dar.

Im Sekretariat der ICAO wurde, ebenso wie in der WMO, eine Abteilung für Flugmeteorologie eingerichtet. Eine solche Doppelstruktur bedarf naturgemäß einer präzisen Abgrenzung der Verantwortlichkeiten für die beiden Schwesterorganisationen, um Doppelgleisigkeiten und Kompetenzkonflikte erst gar nicht entstehen zu lassen. Diese Abgrenzung findet sich deshalb auch schon in einem frühen Dokument, den *Working Arrangements between the WMO and ICAO*, die in den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts niedergeschrieben wurden und im Wesentlichen bis über die Jahrtausendwende hinweg gute Dienste leisteten, Gerangel um Zuständigkeiten hintanhaltend und eine fruchtbare Zusammenarbeit ermöglichte.

**1.2 Weitere Abkommen über Zusammenarbeit**

Neben diesen beiden Hauptakteuren bestehen aber noch eine große Zahl von weiteren Arbeitsübereinkommen mit anderen internationalen Organisationen, so wie etwa der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG), insbesondere mit deren Erdbeben-, Vulkan- und Tektonikschwerpunkten, der International Atomic Energy Agency (IAEA), um bei Katastrophen wie etwa Tschernobyl oder Fukushima rechtzeitig Warnungen an die Luft-

fahrt ausgeben zu können, der *World Health Organization* (WHO), wenn es um Fragen der Gesundheitsfolgen von Luftverschmutzung durch die Luftfahrt geht, und viele andere mehr.

### 1.3 Der Weg zum globalen Vorhersagesystem

Ein Meilenstein in der Zusammenarbeit zwischen WMO und ICAO war sicherlich die Entwicklung eines weltumspannenden Vorhersagesystems für die Flugplanung, mit der Schaffung von Regional- und, im Endausbau, Weltvorhersagezentren. Diese erstellten anhand der von der WMO weltweit gesammelten Daten numerische Prognosen der Wind- und Temperaturverhältnisse in allen Flughöhen bis in die untere Stratosphäre, zusätzlich noch einen Überblick über zu erwartende gefährliche Wettererscheinungen wie etwa Turbulenz, Vereisung, Gewitter und Windscherungen sowie weiträumige Gefahrenzonen im Zusammenhang mit Tropenstürmen und Vulkanausbrüchen. Der Beschluss für ein solches Vorhersagesystem geht auf das Jahr 1983 zurück, mit einem schrittweisen Ausbau bis zum heutigen System mit zwei Weltvorhersagezentren in London und Washington, acht Warnungszentren für Tropenstürme und neun für Vulkanasche. In Kapitel 4 wird auf die Zonen-Aufteilung und weitergehende Pläne, solche Warnzentralen auch für andere Gefahrentypen einzurichten, eingegangen.

### 1.4 Die Rolle der Datennetze: Aeronautical Fixed Telecommunications Network AFTN<sup>1</sup> und das WMO Global Telecommunications System GTS<sup>2</sup>

Der Zugang zu globalen Wetterdaten war von Anfang an eine der kritischen Fragen in der weltweiten Meteorologie. Nicht zuletzt wurde die moderne Meteorologie, die auf der Nutzung von Daten in nahezu Echtzeit aufbaut, erst mit der Einführung der Telegrafie gegen Ende des 19. Jahrhunderts, praktisch ermöglicht.

Durch die Kommerzialisierung meteorologischer Dienstleistungen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entbrannte eine heftige Diskussion über den Zugang zu jenen Wetterdaten, die von den nationalen Diensten unter hohem Aufwand gesammelt wurden, die aber auch als Grundvoraussetzung für jede Form von kommerziellen Wetterdienstleistungen angesehen wurde. Erst der 12. Meteorologische Weltkongress der WMO im Jahre 1995 brachte eine klare Regelung: Nationale Wetterdienste sollten die grundlegenden Daten für einen freien und ungehinderten Austausch zur Verfügung stellen, während zusätzliche Informationen mit höherer zeitlicher Auflösung oder spezielle Daten zu Marktbedingungen angeboten werden konnten. Für die Beobachtungen und Vorhersagen der Flugmeteorologie hatte schon längst eine Ausnahmeregelung gegolten, da ja diese Daten von der Luftfahrt bezahlt wurden (zumindest im Prinzip), wenn auch einige Staaten auf die Einhebung von Gebühren verzichteten und daher im Rahmen der vertraglich geregelten Leistungen für die Flugmeteorologie zur Verfügung gestellt werden mussten. Eine Nutzung durch

Dritte sollte jedoch ausdrücklich hintangehalten werden. Dieses Prinzip ließ sich aber auf Dauer nicht halten, da der US-amerikanische *Freedom of Information Act* jedem Bürger den freien Zugang zu allen Informationen des Staates, die nicht der Geheimhaltung im Dienste der Nationalen Sicherheit unterliegen, garantiert. In diesem Zusammenhang wurden aber auch die Flugwetterdaten anderer Staaten plötzlich über die Netzwerke der US-Behörden allgemein zugänglich.

Ein wesentlicher Unterschied besteht aber weiterhin: Während die grundlegenden Wetterdaten (etwa SYNOP, TEMP, etc.) ausschließlich auf den Datennetzen der WMO ausgetauscht werden, sollten die Flugwetterdaten ausschließlich über die Netzwerke der ICAO ausgetauscht werden. Etwa seit dem Anbruch des 21. Jahrhunderts ist die WMO dabei, ihre Netzwerke, die ohnehin schon einigermaßen hohe Übertragungsgeschwindigkeiten zuließen, nunmehr auf ein gänzlich netzwerkorientiertes datenzentrisches System umzustellen. Dieses System, das **WMO-Informationssystem** oder **WIS**, erlaubt nicht nur raschen Zugriff auf operationelle Wetterdaten, sondern auf dem Weg der „Datensuche und Entdeckung“ auch wissenschaftliche und spezielle Daten und Archive zugänglich zu machen. Das traditionelle telegrafienorientierte *Aeronautical Fixed Telecommunication Network* der ICAO hingegen hinkte hier technologisch stark hinterher und wird erst langsam von modernen Strukturen des AFS abgelöst, die an dem WMO-WIS-Netzwerk orientiert sind und auf modernen Industriestandards wie *Extendable Markup Language* XML oder *Geography Markup Language* GML basierende „Weather Exchange Models“ einführen.

Hier muss die Rolle der neuen Projekte im Bereich des **Air Traffic Management** (ATM) hervorgehoben werden. Das US-amerikanische **Next Generation** ATM-System (NextGen) hatte vorlaufende Arbeiten aus dem militärischen Sektor übernommen und diese wurden gemeinsam mit dem europäischen **Single European Sky Aviation Research**-Projekt (SESAR), unter der Themenführerschaft der *European Organisation for the Safety of Air Navigation* EUROCONTROL, weiterentwickelt. Die beiden globalen Organisationen WMO und ICAO haben sich folgerichtig entschlossen, hier aus Gründen der Kompatibilität und Wirtschaftlichkeit diese vorlaufenden Arbeiten der regionalen ATM-Systeme als Grundlage für eine harmonisierte Entwicklung der *Weather Exchange Models* zu verwenden. Gleichzeitig werden die Erfahrungen und Vorarbeiten der WMO besonders auf dem Gebiet der Metadaten im vollen Umfang verwendet, was für die Integrität, Nutzbarkeit und das Qualitätsmanagement dieser Beobachtungen eine fundamentale Rolle spielt.

### 1.5 Die Rolle der meteorologischen Satelliten und deren Koordination

Im Zusammenhang mit dem weltumspannenden Vorhersagesystem muss aber auch die Rolle der Betreiber-

<sup>1</sup> soll durch das Aeronautical Fixed Service AFS ersetzt werden

<sup>2</sup> das derzeit in das neue WMO Information Systems WIS übergeführt wird

organisationen für meteorologische Satelliten gewürdigt werden, die zu einem großen Teil für die Verfügbarkeit von Wetterdaten in allen Höhen und allen Erdteilen zuständig sind. Neben großen nationalen Einrichtungen in den USA, Japan, China und Indien ist hier besonders die *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* EUMETSAT zu nennen, die nicht nur die derzeit fortschrittlichste Technologie im Bereich der geostationären Satelliten (METEOSAT-Serie), sondern auch im Bereich der auf einer polaren Umlaufbahn befindlichen Satelliten wichtige Informationen für die Flugmeteorologie liefert.

Aber auch die Luftfahrt selbst leistet einen erheblichen Beitrag zur Erfassung atmosphärischer Vorgänge in allen Skalen. Aufbauend auf ein neues Konzept, Flugzeuge als fliegende Messstationen zu verwenden, das während des ersten globalen Experiments des Globalen Atmosphären-Forschungsprogrammes *First GARP Global Experiment* (FGGE) ab 1979 eingesetzt wurde, gelang es, diesen Gedanken auf eine große Anzahl von Verkehrsflugzeugen auszudehnen, so dass heute mehr als 2 500 Flugzeuge etwa 300 000 automatisierte Wettermeldungen auf ihrer Route absetzen und den Wetterdiensten zur Verfügung stellen. Das dazu aufgebaute WMO-Programm *Aircraft Meteorological Data Relay* (AMDAR) baut auf vielen nationalen und regionalen Unterprogrammen auf, von denen E-AMDAR der EUMETNET (Zusammenschluss der west- und mitteleuropäischen Wetterdienste) das am weitesten fortgeschrittene ist.

Für einen Benutzerkreis wie die internationale Zivilluftfahrt, der globaler nicht sein könnte, versteht es sich also von selbst, dass auch die Dienstleister über eine globale oder zumindest kontinentale und überregionale Vernetzung verfügen müssen, um ihren Aufgaben gerecht werden zu können.

### 1.6 Die Entwicklung der Beziehungen zu den Benutzern flugmeteorologischer Dienstleistungen

Wie das Beispiel der Gebrüder Wright zeigte, waren die ersten Nutzer von flugmeteorologischer Information die Piloten, die ihr Leben den doch recht fragilen Fluggeräten anvertrauten. Noch heute ist Wetterinformation ein wesentlicher Teil der Flugvorbereitung jedes verantwortlichen Flugzeugführers (*Pilot in Command*), wenn auch die Informationswege ganz andere geworden sind. Während bis in die 80er Jahre des vergangenen Jahrhunderts persönliche Wetterberatungen sowohl für kommerzielle wie für private Luftfahrtteilnehmer die Regel waren, sind durch die Möglichkeiten der elektronischen Kommunikation die Besuche von Piloten bei einer besetzten Wetterberatungsstelle auf einige wenige, überwiegend in Entwicklungsländern befindlichen, Flughäfen beschränkt, während die überwiegende Mehrheit heute durch einen sogenannten *Electronic Flight Bag* informiert wird, und diese Information über einen Laptop, oder Tablet-Computer betrachtet wird. Während diese Entwicklung für die

Informationsweitergabe an Piloten als durchaus adäquat bezeichnet werden kann, ist beim Informationsrückfluss (Feedback) ein doch spürbares Defizit zu verzeichnen. Die ständige Information durch Piloten über das Zutreffen (oder dessen Gegenteil) der letzten erhaltenen Information war ein wesentliches Element in der Kompetenzverbesserung der praktischen Flugmeteorologen; dieses Defizit muss nunmehr durch komplexe Feedbacksysteme, etwa im Rahmen der Kundenzufriedenheits-Erhebungen der Qualitäts-Management-Systeme, ersetzt werden.

Eine weitere Methode des Informationsaustausches sind die entsprechenden Abteilungen der Fluglinien (*Dispatch, Flight Following, Operations Control*). Diese beziehen die Informationen für die Flugplanung von den Vorhersagezentren des *World Area Forecast System*, der regionalen Warnzentren und schließlich von den Meteorologischen *Watch Offices* und *Aerodrome Met Offices*, die die Beobachtungen, Vorhersagen und Warnungen für die Fluginformationsregionen (*Flight Information Regions* oder FIR) und die einzelnen Flughäfen bereitstellen.

## 2 Die Rolle internationaler Standardisierung

### 2.1 Die Standards für verbindlich zu erstellende Produkte und Dienstleistungen

Wie im Arbeitsübereinkommen zwischen WMO und ICAO geregelt, obliegt es der zweitgenannten, einen Kodex zu erstellender Produkte und Dienstleistungen sowie ein dazu gehöriges „Leistungsheft“ festzulegen, das die Mindestanforderungen in Bezug auf Genauigkeit, Vollständigkeit und Verlässlichkeit dieser Produkte festlegt. Diese Festlegung erfolgt durch einen stark formalisierten und auch zeitaufwendigen Prozess unter Einbeziehung aller Beteiligten, also der Benutzergruppen Luftfahrtunternehmen (vertreten durch die IATA), Luftfahrtregulatoren (nationale und regionale Zivilluftfahrtbehörden), Dienstleitern (vertreten durch nationale Wetterdienstleister und die WMO), sowie den internationalen Berufspilotenverband IFALPA, Vereinigungen der Luftfahrzeughalter und -hersteller (IAOPA, ICCAIA), Berufsverbände der Dispatcher und anderer.

Die Ausarbeitung von Vorschlägen für neue oder geänderte Standards (mit verpflichtendem Charakter) oder „Empfohlenen Verfahren“ (*Recommended Practices*) wird in erster Linie in den Arbeits- und Studiengruppen der ICAO geleistet. Solche Gruppen bestehen für Beobachtungen und Vorhersagen (*Aerodrome Met Observations and Forecasts Study Group* AMOF-SG), für meteorologische Warnungen (wie etwa SIGMET oder flughafenbezogene Warnungen), METWARN-SG, und spezifische Gruppen, die sich mit Fragen des weltweiten Vorhersagesystems WAFS, der Verbreitung dieser Daten (SADISOPSG), und die Gruppe, die sich mit der Vorhersage der Ausbreitung von Vulkanasche, radioaktiven und chemischen Risikostoffen sowie mit den Effekten solarer

und kosmischer Ereignisse (*Space Weather*) befasst, der IAVWOPSG.

## 2.2 Vorteile und Notwendigkeit standardisierter Produkte und Dienstleistungen

Es dürfte sehr schwierig sein, die Gesamtzahl von Berufspiloten weltweit zu bestimmen, aber nach einer Auskunft der US Federal Aviation Authority gab es 2007 585 241 Piloten mit aufrechter Berechtigung, davon 141 935 Piloten mit Linienflugberechtigung. Aufgrund des rasanten Wachstums der Luftfahrt in Asien, Südamerika und dem pazifischen Raum ist anzunehmen, dass inzwischen weltweit deutlich mehr als eine Million Pilotenberechtigungen ausgegeben wurden, und vermutlich zwischen 250 000 und 350 000 Linienflug-Berechtigungen. Alle diese Piloten bedürfen einer regelmäßigen Weiterbildung in dem Regelwerk der ICAO, und unter der Annahme, dass es wohl nur wenige Linienpiloten gibt, die keine Flüge ins Ausland unternehmen, ist es einleuchtend, dass nur eine weltweite Standardisierung der Vorschriften und Anforderungen die Sicherheit der Luftfahrt gewährleisten kann. Die Risiken von grundlegenden Änderungen solcher Vorschriften soll durch das Beispiel eines – erfreulich glimpflich verlaufenen – Vorfalles in Kanada verdeutlicht werden. Nach einer Umstellung ins metrische System wurden die Handbücher für die Betankung der Flugzeuge von Pfund auf Kilogramm für die erforderliche Treibstoffmenge umgestellt. Beim Flug Air Canada 143 von Montreal nach Edmonton via Ottawa war im Juli 1983 die Tankanzeige ausgefallen und der Rest von Jet Fuel in den Tanks wurde durch einen Messstab geprüft. Danach errechnete ein Techniker die benötigte Treibstoffmenge anhand der gegebenen Tabellen und führte die Betankung nach dem Ergebnis der Berechnung durch. Die Macht der Gewohnheit ließ den betroffenen Luftfahrzeugwart aber den errechneten Wert für den erforderlichen Treibstoff als Pfund interpretieren, was zu einem Fehlbetrag von 55 % führte, und zu einer Notlandung der Maschine im antriebslosen Segelflug auf einem aufgelassenen Royal Canadian Airforce-Flugplatz bei Gimli, der aber inzwischen in einen Industriepark umgewandelt worden war und auf dem gerade ein *Cart Race* stattfand. Nur durch ein Wunder wurde bei diesem Unfall niemand getötet oder schwer verletzt, der betroffene Flug ging als der *Gimli Glider* in die Geschichte ein. Die Gefahr von sich ändernden oder unklaren Standards wurde durch diesen Zwischenfall jedoch verdeutlicht.

Neben der Notwendigkeit, formale und inhaltliche Normen bei sicherheitsrelevanten Produkten wie etwa Warnungen (SIGMET) einzuhalten, spielt auch die regionale Koordination und Kohärenz zwischen Produkten benachbarter Dienstleister eine wichtige Rolle. Die historisch gewachsenen Produkte, wie etwa SIGMET, AIRMET und GAMET betreffen jeweils genau eine **Flug-Informationen-Region** (FIR), wobei leider zu oft nicht bedacht wird, wie rasch ein modernes Verkehrsflugzeug von einer solchen Region in die nächste wechselt. Ein fundamentales Problem der

traditionellen Codes der OPMET-Daten ist ihre doch recht „schwammige“ Formulierung und Definition von Intensitäten. Ob eine Vereisung, Turbulenz oder Windscherung nun als *moderate* oder *severe* zu bezeichnen ist, wird schon von den verschiedenen Piloten, die diese Meldungen absetzen, verschieden interpretiert. Der Flugmeteorologe, der (im günstigsten Fall ...) einen solchen Pilotenbericht durch die zuständige Flugsicherungsstelle übermittelt bekommt (er kann ja nicht mit dem Piloten selbst sprechen...), wird wiederum aus den ihm zur Verfügung stehenden Wetterdaten, den Pilotenberichten und seiner Erfahrung heraus versuchen, eine möglichst zutreffende Intensitätsstufe des beobachteten oder erwarteten Phänomens anzugeben.

Bei all diesen doch recht subjektiven Einschätzungen, die vom Zufall, dem Flugzeugtyp und dessen Anfälligkeit für bestimmte Phänomene, und dem Naturell des verantwortlichen Piloten (Erfahrung, Risikobereitschaft, Tagesverfassung) abhängen, wird die Notwendigkeit für Standardisierung sehr deutlich. Eine solche verlangt aber wiederum eine internationale Einigung auf Maßzahlen, wie etwa die normierte Vertikalbeschleunigung oder die *Eddy Dissipation Rate* bei Turbulenz, die Zuwachsrate des Eisansatzes am Flugzeug beziehungsweise der relativen Änderung der Relativgeschwindigkeit (*air speed loss/gain*) bei Windscherung. Auch hier sind WMO und ICAO gefordert, eine Einigung über Messmethoden, Maßzahlen und deren Umsetzung in Intensitätskriterien nicht nur „im stillen Kämmerlein“ zu erzielen, sondern nachvollziehbar zu begründen, zu publizieren und in Schulungen für alle Beteiligten als verlässliches, gemeinsames Grundwissen zu verankern.

## 2.3 Verpflichtung zur Einführung eines Qualitäts-Management-Systems (QMS) für flugmeteorologische Dienstleister

Zusätzlich zu den Normen der ICAO (Annex 3 Standards and Recommended Practices) und WMO (Beobachtungen, Datenübertragung, Schulung) wird von den Dienstleistern seit 15. November 2012 auch die Einführung eines funktionierenden und ordentlichen **Qualitäts-Management-Systems** (QMS) verlangt. Dieses System sollte nach dem Modell des ISO-Standard 9001:2008 eingerichtet sein, und zumindest durch Audits nachweisbar sein. Für den Anfang hat ICAO auf den Nachweis eines ISO-Zertifikats verzichtet, weil ein solches Zertifikat mit teils erheblichen Kosten verbunden ist und in einem 3-Jahres-Rhythmus erneuert werden muss, was über den Umweg der Kostenrückerstattung an die Wetterdienste sich auf die Kosten der Dienstleistung niederschlagen würde, die Zertifizierung wird aber als „empfohlenes Verfahren“ (*Recommended Practice*) gewertet.

Qualitätsmanagement wird häufig mit Qualitätskontrolle verwechselt, geht aber weit über diese hinaus. Die fundamentalen Prinzipien des Qualitätsmanagements nach ISO 9001:2008 stellen eine Reihe von grundlegenden Grundsätzen in den Vordergrund, darunter:

- **Schwerpunkt Kundenorientierung**  
Viele traditionelle Dienste (und hier sind nicht nur die Wetterdienste, sondern eine Mehrzahl öffentlicher Dienstleister angesprochen) bauen auf dem Prinzip auf, dass ihre Expertise ihnen erlaubt festzustellen, was für den Benutzer wichtig und nützlich ist oder zu sein hat. QMS hingegen stellt eindeutig den Primat des „Kunden“ fest, Qualität wird als der Grad der Erfüllung von nutzerdefinierten Anforderungen durch den Dienstleister definiert, diese Zufriedenheit darf nicht einfach vorausgesetzt werden, sondern muss durch regelmäßige Untersuchungen, Gespräche und Umfragen nachgewiesen werden.
- **Führungsstärke, kombiniert mit Einbeziehung der Mitarbeiter**  
Dieser Grundsatz verlangt eine vollständige Unterstützung des QMS durch die Führung des Dienstes.
- **Prozess-Orientierung**  
Jede 24/7-Dienstleistung, die rund um die Uhr an 7 Tagen pro Woche mit gleichbleibender Qualität erbracht werden soll, muss auf wohlgedachten, gut dokumentierten und nachvollziehbaren Prozessen aufbauen. Dieses Prinzip soll sicherstellen, dass das jeweils im Dienst eingeteilte Personal in ähnlichen Situationen ähnliche Produkte zu liefern imstande ist und dass die Qualität der Produkte, zumindest die Erreichung der geforderten Mindeststandards, unabhängig vom Schichtdienstplan garantiert ist.
- **Kontinuierliche Verbesserung der Dienstleistung und Produkte**  
Wie schon erwähnt, hat das Ende der persönlichen Wetterberatung an den meisten Flughäfen zu einem Verlust der Rückkoppelung zwischen Flugmeteorologen und Piloten geführt, und die Intensivierung der Kundenorientierung des QMS kann als eine Möglichkeit zur Erlangung von Informationen über nicht zufriedenstellende Produkte und Leistungen dienen. Eine systematische Erfassung solcher Defizite ist die Voraussetzung für eine kontinuierliche Verbesserung der Dienstleistung. Zum einen werden reaktiv auf bekannt gewordene Defizite geeignete Verbesserungsmaßnahmen ergriffen, zum anderen proaktiv Schritte im Einvernehmen mit den Kunden (Luftfahrtunternehmen, Piloten, Flugverkehrsmanagern und Flughafenbetreibern) gesetzt, die mögliche Defizite vorab durch geeignete Maßnahmen abfangen können.

#### 2.4 Einführung des Kompetenzprinzips für Mitarbeiter im Flugwetterdienst

Die Zivilluftfahrt zeichnet sich durch eine Besonderheit in den Anforderungen an die Qualität der Mitarbeiter in allen Gebieten aus: Zivilluftfahrtpersonal muss nicht nur die notwendigen Qualifikationen in Form von absolvierten Schulungen und abgelegten Prüfungen nachweisen, sondern auch praktische Kompetenz in der Erfüllung der

täglichen Aufgaben durch eine Überprüfung am Arbeitsplatz oder einer geeigneten Simulation dieser Arbeitsumgebung unter Beweis stellen. Die WMO hat anlässlich des XVI World Meteorological Congress eine solche Verpflichtung in ihre *Technical Regulations WMO No 49*, Vol. 1, aufgenommen, und ein System für die Überprüfung dieser Kompetenzen eingeführt, das alle Mitgliedsstaaten bis Ende 2013 einführen sollen.

Die wesentlichen Komponenten dieser Kompetenzen werden auf drei Ebenen aufgegliedert: Grundlegende, universell anwendbare Kompetenzen für Flugmeteorologen (*forecaster*), Erläuterungen zur Umsetzung dieser Richtlinien mit Berücksichtigung regionaler Besonderheiten, nationale Regelungen unter der Verantwortlichkeit des jeweiligen Dienstleisters beziehungsweise der meteorologischen Aufsichtsbehörde (*Meteorological Authority*).

Die universellen Prinzipien werden von einer Präambel begleitet, die auf die regionalen, organisatorischen und die in Kraft befindlichen Regulative für den betreffenden Arbeitsplatz verweisen. Diese wird durch die drei folgenden qualifizierenden Bestimmungen erreicht. Die Kompetenz eines Mitarbeiters wird durch die nachgewiesenen Fähigkeiten unter den oben erwähnten Einschränkungen nachgewiesen:

Ein(e) Flugmeteorologe(in) muss

- für seinen/ihren Aufgabenbereich und den Luftraum unter seiner/ihrer Verantwortung,
- unter Berücksichtigung der Auswirkungen bestimmter Wetterphänomene und Parameterwerte auf den Flugbetrieb,
- in Erfüllung von Benutzererfordernissen, nationalen und internationalen Regulativen und örtlichen Verfahren und Prioritäten,

zu den folgenden Aufgaben fähig sein:

1. Die bestehende Wettersituation kontinuierlich überwachen und analysieren.  
Darunter ist zu verstehen, dass die vorherrschende Wetterlage korrekt analysiert ist, ihre Auswirkungen auf den Flugbetrieb verstanden werden, und die Prioritäten entsprechend den damit verbundenen Risiken und Auswirkungen gesetzt werden. Kontinuierlich in diesem Sinne bedeutend, dass der/die Mitarbeiter(in) in Erkenntnis der Lage unvermeidliche Absenzen vom Arbeitsplatz von dem damit verbundenen Risiko abhängig macht (zum Beispiel keine Kaffeepause bei heraufziehenden Gewittern).
2. Vorhersage von flugmeteorologisch relevanten Phänomenen und Parametern  
Unter dieser Kompetenz wird die Fähigkeit verstanden, alle an dem Arbeitsplatz erforderlichen Produkte und Dienstleistungen unter Beachtung der einschlägigen Vorschriften zu erbringen.
3. Warnung vor gefährlichen Wetterscheinungen.  
Unter dieser Forderung ist die Fähigkeit zu verstehen, vor für die Luftfahrt gefährlichen Wettererscheinungen, die in den internationalen und nationalen Richtlinien

erfasst sind, rechtzeitig und unter Berücksichtigung der gegebenen Grenzwerte und Kriterien zu warnen.

#### 4. Gewährleistung der Qualität von Produkten und Dienstleistungen.

Wie unter Punkt 2.3 ausgeführt, verlangt die Anwendung eines QMS die aktive Beteiligung aller Mitarbeiter. Unter diesem Aspekt ist die Forderung zu sehen, dass alle Flugmeteorologen an den wesentlichen Elementen des QMS beteiligt sind, wie etwa die Einholung von Informationen zur Benutzerzufriedenheit, die Einhaltung der Prozesse und Prozeduren des Dienstleisters, Kontrolle der Dokumentation und Archive und Vorschläge zur Verbesserung der Dienstleistung, sowie zur Vermeidung von Defiziten.

#### 5. Effektive Informationsweitergabe an interne und externe Benutzer sowie Kommunikation mit diesen.

Auch die beste Information ist nutzlos wenn sie den intendierten Benutzer entweder nicht erreicht oder von ihm nicht ausreichend verstanden werden kann, um seinen Entscheidungsprozess in eindeutiger und nachvollziehbarer Weise zu unterstützen und die drauf beruhenden Entscheidungen zu begründen. Diese Kompetenz hat sowohl sprachliche Komponenten (etwa die Fähigkeit, sich sowohl in der/den Nationalsprache(n) als auch auf Englisch klar auszudrücken) als auch die Notwendigkeit zur Beherrschung der elektronischen und traditionellen Informationsübertragungswege einschließlich der vorhandenen Kontingenzmaßnahmen bei Ausfall der routinemäßig verwendeten Systeme.

### 3 Neue Herausforderungen an die Flugmeteorologie durch die Einführung neuer Flugverkehrs-Management-Systeme

Das kräftige Wachstum des Flugverkehrs in Nordamerika und Europa über die letzten Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts führte zu einer verbreiteten Sorge, dass die traditionellen Systeme des Luftverkehrsmanagements und Verkehrskontrolle bald an ihre natürlichen Grenzen stoßen würden, wenn die Lufträume um die Ballungszentren eine Verkehrsdichte aufweisen würden, die mit der traditionellen Flugsicherungsmethodik nicht mehr zuverlässig gehandhabt werden könnte. Allen Beteiligten wurde deutlich vor Augen geführt, dass auch schon mäßig kritische Wetterereignisse zu einer Verringerung der Annahmekapazität von Zentralflughäfen und überlasteten Lufträumen führten, mit der unhaltbaren Konsequenz von massiven Flugverspätungen, Ausfällen und Ausweichlandungen. Die Antwort auf diese Entwicklung war die Entwicklung neuer, leistungsbezogener Managementsysteme in den USA (unter der Bezeichnung NextGen – **N**ext **G**eneration Air Traffic Management System) und SESAR (Single European Sky ATM Research).

Diese Systeme bauen auf drei Säulen der Erneuerung auf:

- Übergang zu einem netzwerkorientierten und datenbasierenden Informationssystem (siehe Kapitel 1.4),
- leistungsbezogene Managementsysteme mit klaren Zielvorgaben für Luftraumbewirtschaftung und Eliminierung

von Hindernissen, Schaffung von transnationalen Luftraumblöcken,

- ein vorwärtsschauendes System der Vergabe von vierdimensionalen Flugtrajektorien an die Luftverkehrsteilnehmer, die a priori als konfliktfrei (das heißt kein Flugzeug wird bei Einhaltung der vorgegebenen Trajektorie einem anderen oder Terrainhindernissen zu nahe kommen) berechnet werden und somit Eingriffe traditioneller Flugsicherung minimieren sollten.

Diese Systeme sind so konzipiert, dass unter „idealen“ Bedingungen keinerlei Eingriffe von Seiten der Flugsicherung mehr nötig wären, solange alle Teilnehmer am Luftverkehr die im Voraus berechneten und vereinbarten Trajektorien präzise einhalten. Es bedarf allerdings keiner blühenden Phantasie und nur einiger praktischer Erfahrung in der Luftfahrt, um die beträchtlichen Herausforderungen an das Funktionieren eines solchen „idealisierten“ Verkehrslenkungssystems zu identifizieren.

Die tatsächlichen Trajektorien der Flugzeuge hängen in der Realität vollkommen von den herrschenden Wetterbedingungen am Startflughafen, entlang der Flugroute und im Bereich des Zielflughafens ab. Nicht zuletzt haben zahllose Untersuchungen, etwa im Projekt FLYSAFE im Rahmen des 6. Rahmen-Programmes der EU, aber auch in den USA, einen direkten Zusammenhang zwischen dem Auftreten bestimmter Wettererscheinungen und den Flugverspätungen ergeben. Nicht nur die naheliegende Rolle der Windgeschwindigkeit entlang der Flugroute, sondern auch Effekte wie Turbulenz und Vereisung führen sowohl zu einer Verringerung der Geschwindigkeit, als auch zur Notwendigkeit eines Wechsels der Flughöhe, was die so mühsam erstellte Harmonie - nicht der Sphären -, sondern der Trajektorien flugs zunichte macht.

Die Problematik der Ungewissheit meteorologischer Parameter in einer Flugsicherungs-Umgebung, die auf deterministische Systeme höchster Zuverlässigkeit setzt, erfordert daher eine neue Methodologie, die zwischen den beiden unterschiedlichen Kulturen eine Brückenfunktion übernimmt.

In der Zusammenarbeit zwischen der meteorologischen Arbeitsgruppe für die Unterstützung des Air Traffic Management (ATM) und dem Gremium, das die Anforderungsprofile bezüglich der Dienstleistungen für ATM erstellt, wird nun an dem Entwurf einer solchen Methodologie gearbeitet. Erste Ansätze sehen hier die Möglichkeit vor, den geplanten Sicherheitsabstand in vier Dimensionen zwischen Flugzeugen je nach der erwarteten Ungewissheit der meteorologischen Bedingungen entlang der berechneten Trajektorien (Wahrscheinlichkeit von Gewittern, Turbulenz, Vereisung oder Windscherung) in der Größe zu variieren um somit auch im ungünstigsten Fall von signifikanten Abweichungen vom vorhergesagten Zustand der Atmosphäre die nötige Sicherheit zu gewährleisten. Regelmäßige Neuberechnungen der Bedingungen unter Berücksichtigung der eingegangenen Wetterdaten und Positionsdaten der Flugzeuge werden es erlauben, die Trajektorien in kurzen

Abständen an die geänderten Bedingungen anzupassen, und die „Sicherheitszonen“ wieder auf ein der Flüssigkeit der Verkehrs und der Aufrechterhaltung der Sicherheit angepasstes Maß zurückzuführen.

Die regionalen ATM-Systeme (SESAR für den europäischen Bereich in Zusammenarbeit mit EUROCONTROL) haben Verträge mit führenden Wetterdienstleistern und F&E-Organisationen abgeschlossen, die eine rasche Entwicklung der meteorologischen Information im Gleichschritt mit der Entwicklung der ATM-Systeme sicherstellen soll.

Die ICAO hat als globaler Regulator die zukünftige Entwicklung der ATM-Systeme in einem **Globalen Air Navigation Plan (GANP)** zusammengefasst, die sich in sukzessiven Schritten, sogenannten **Aviation System Block Upgrades (ASBU)** über die kommenden Jahrzehnte bis etwa 2030 erstrecken wird. Die Einführung von regionalen Kooperationen baut auf schon existierenden Kooperationsmodellen auf, die im folgenden Absatz beschrieben werden.

#### 4 Existierende Modelle für Regionale Kooperation in der Erbringung von Dienstleistungen für die zivile Luftfahrt

Wie schon in Kapitel 1.3 erwähnt, wurden besondere Phänomene, wie etwa die Verbreitung von Vulkanasche nach heftigen Ausbrüchen, und die Gefahren von Tropischen Wirbelstürmen, schon früh als regionale Probleme erkannt und behandelt.

Die Tragweite dieser Problematik wurde erst voll erkannt nachdem eine Boeing 747 der British Airways mit Flugnummer BA 9 von London Heathrow nach Auckland (NZ) im Juni 1982 über Indonesien während des Nachtflugs Richtung Melbourne unerwartet in die Aschenwolke des soeben ausgebrochenen Mount Galunggung geraten war und unfreiwillig die erstaunlich guten Segelflugeigenschaften des Jumbo Jet (und die hervorragende Kompetenz und Nervenstärke der Besatzung unter Captain Eric Moody und Senior First Officer Roger Greaves) nach dem Ausfall sämtlicher Triebwerke unter Beweis stellen musste, die erst in geringer Höhe über dem Meer wieder teilweise in Betrieb genommen werden konnten. Untersuchungen des Flugzeugs und seiner Triebwerke ergaben, dass die Vulkanasche nicht nur massivste Schäden an den Kompressorschaukeln der Triebwerke und durch Anschmelzen der Asche eine weitgehenden Verstopfung der *Hot Section*, sondern auch ein „Abschmirgeln“ der Cockpitfenster und exponierten Flächen des Flugzeugs bewirkt hatte.

Mit großem Nachdruck wurde daher ein Vorhersagesystem mit regionalen Vorhersagezentren (*Volcanic Ash Advisory Centers* oder VAAC) eingerichtet, die anhand von komplexen atmosphärischen Transport- und Diffusionsmodellen und den Angaben von Vulkanobservatorien beziehungsweise der Entdeckung von Ausbrüchen unbewachter Vulkane auf Satellitenbildern Vorhersagen der Ausdehnung der Aschewolken erstellten. Kontinuierliche Verbesserungen des Systems haben trotz einiger ähnlicher Zwischenfälle für die folgenden 30 Jahre verhindert, dass ein Verkehrsflugzeug aufgrund von Vulkanasche zum Absturz gekommen wäre. Der Ausbruch des isländischen Ey-

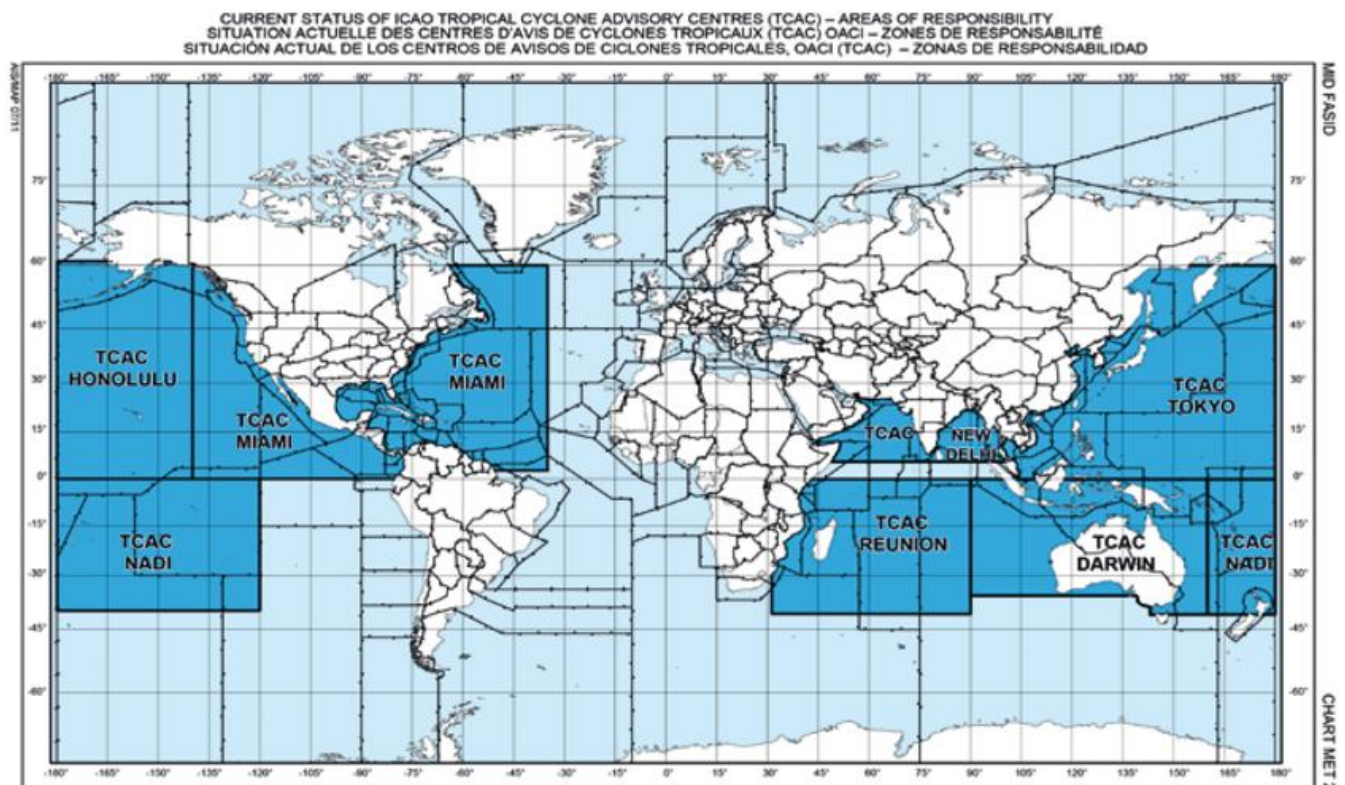


Abb. 2-2: Die Aufteilung der Verantwortungsgebiete für die einzelnen Volcanic Ash Advisory Centers.

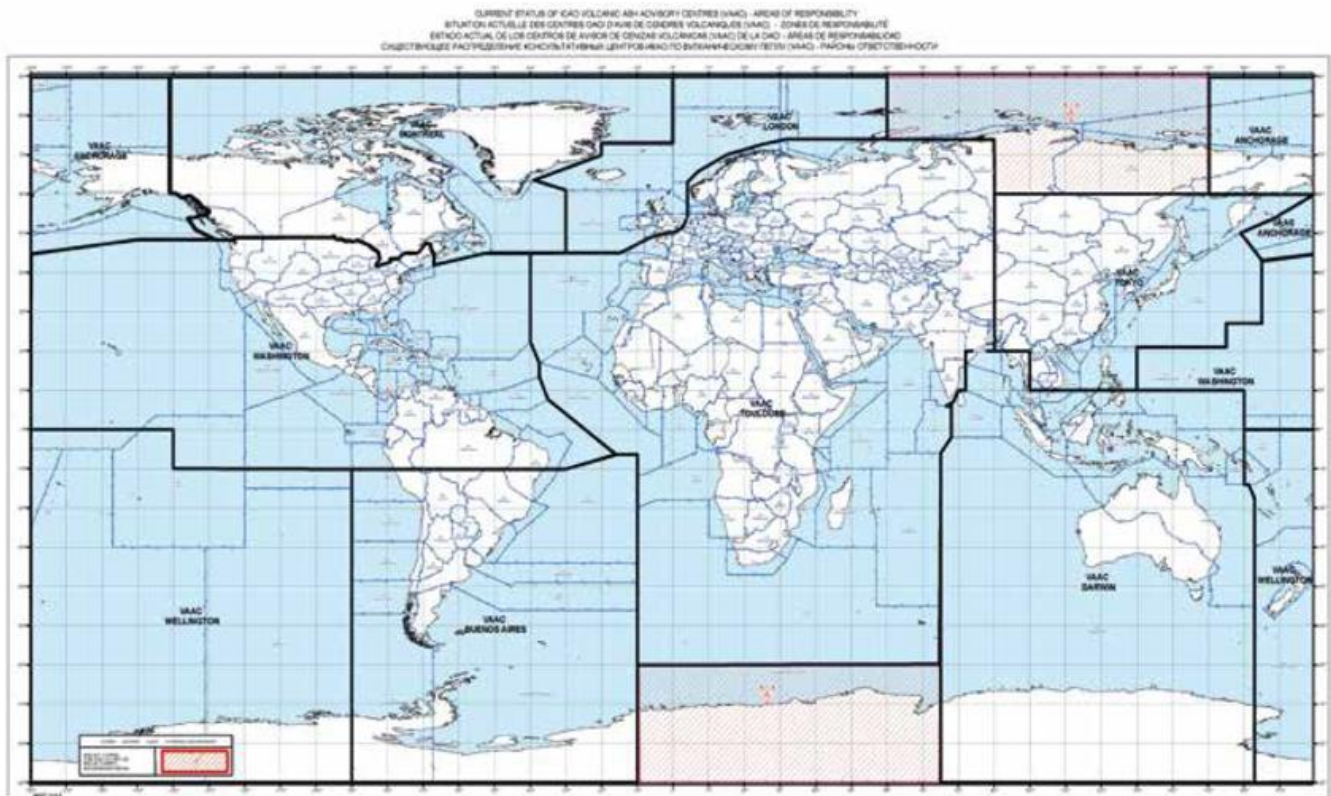


Abb. 2-3: Gebietsaufteilung der Tropical Cyclone Advisory Centers.

jařjallajökull im April 2010 führte aber deutlich vor Augen, dass das auf Sicherheit hin optimierte System bei längeren Ausbruchserien in einem dicht beflogenen Luftraum zu extremen Behinderungen des Luftverkehrs führen musste, solange jedes Luftvolumen, das potentiell mit Asche durchsetzt sein könnte, umflogen werden musste. Die Verluste für die Wirtschaft, die aus dem Ereignis 2010 resultierten, lösten eine noch nie dagewesene Anstrengung der Wetterdienste, Modellexperten, Vulkanologen und Beobachtungsspezialisten von Satelliten bis hin zu bodengestützten LIDAR-Systemen aus, die in einer dichten Serie von internationalen Arbeitstreffen unter Einbeziehung aller beteiligten Wissensbereiche von der Atmosphärenphysik bis zur Triebwerkstechnologie eine Verfeinerung und Quantifizierung der Vorhersagemethoden anstrebten, die zu einer Vermeidung von extremen wirtschaftlichen Schäden bei Aufrechterhaltung der Sicherheit führen sollen.

Ein ähnliches System wurde für die Vorhersage der Zugbahnen von tropischen Wirbelstürmen eingerichtet, die durch 8 Tropical Cyclone Advisory Centers, die anhand von hochauflösenden numerischen Vorhersagemodellen, Satellitenbildern, Beobachtungsmeldungen und Berichten von Aufklärungsflugzeugen die betroffenen Länder und ihre Wetterdienste durch regionale *Advisories* (Warnungsübersichten) rechtzeitig vor den Gefahren eines heranziehenden tropischen Wirbelsturms warnen.

Um eine bessere Harmonisierung aller meteorologischen Warnungen vor flugbetrieblich relevanten Gefahren und eine gleichmäßige Verlässlichkeit unabhängig von der technischen und personellen Ausstattung der Warnzentra-

len auch kleinerer oder in Entwicklung befindlicher Länder sicherzustellen, gibt es innerhalb der ICAO Bestrebungen, dieses Prinzip regionaler Advisory Centers auf die übrigen Wettergefahren für die Luftfahrt auszudehnen, und damit sowohl die kleineren und schlechter ausgestatteten nationalen Zentren zu unterstützen, aber auch schon eine erste, grobe „Frühwarnung“ der Endnutzer zu erstellen, um keine Zeit durch die Übergabestaffeln zu verlieren.

## 5 Fazit

Noch zu keiner Zeit hat sich das Anforderungsprofil an die Flugmeteorologie so gründlich und rasch geändert wie zu Beginn des 21. Jahrhunderts. Die Radikalität des Wandels verlangt nach neuen Formen der Zusammenarbeit, einem stärkeren Schulterschluss der nationalen und regionalen Zentren, und einer Verbesserung der Kommunikationsmethoden unter Einbeziehung modernster Technologien. Es erscheint dem Passagier absurd, dass in manchen Flugzeugen die Passagiere über ihren mobilen Internetzugang farbige Grafiken der sie umgebenden Wetterbedingungen abrufen können, während die verantwortliche Besatzung noch auf alphanumerische, im Schnecken tempo einlangende Informationen über Flugfunk-Frequenzen angewiesen ist. Ein Umbruch mit weitgehender Automatisierung und Beschleunigung der Informationswege wird eine der wesentlichen Voraussetzungen dafür sein, dass auch in einem zukünftig wesentlich dichteren Flugverkehr die Verspätungen auf ein Minimum beschränkt bleiben können, und die schon jetzt hervorragenden Sicherheitsstandards nicht nur gehalten, sondern noch verbessert werden.

S. KOOS

# 3 Der Single European Sky und das Wetter - Die Aufgaben der Flugwetterdienste im SESAR-Programm

## The Single European Sky and the Weather - Activities of the Aeronautical Meteorological Services in the SESAR Program

### Zusammenfassung

Das *Single European Sky Air Traffic Management Research* (SESAR)-Programm ist ein Gemeinschaftsprojekt von über 110 Partnern, gegründet von EUROCONTROL und der Europäischen Kommission mit einer Laufzeit von 2004 - 2020. Ziel ist die Modernisierung und Defragmentierung des europäischen Luftraumes und Luftverkehrsmanagements durch Erneuerung der Systeme und Optimierung der Abläufe. Das Programm gliedert sich in 17 Arbeitspakete. Die Aufgaben der Wetterdienste sind die Vernetzung mit den Nutzern und die Integration derer Anforderungen in die Entwicklung der meteorologischen Produkte. Der Deutsche Wetterdienst beteiligt sich maßgeblich an der Harmonisierung der Vorhersageprodukte. SESAR steht im Austausch mit dem US-amerikanischen Pendant Projekt *Next Generation Air Traffic Management System* (NextGen). Die Umsetzung der entwickelten Konzepte und Systeme findet nach erfolgreicher Validierung in der Abschlussphase des Projektes statt.

### Summary

The *Single European Sky Air Traffic Management Research* (SESAR) programme is a common project between more than 110 partners lead by EUROCONTROL and the European Commission from 2004 to 2020. The aim of SESAR is the modernization and defragmentation of the European Airspace and Air Traffic Management by optimizing the processes and improving the systems. The program includes 17 work packages. The national weather services need to network with the users and integrate their requirements into the development of the new meteorological products. The German Weather Service is mainly involved in the harmonization of the forecast products. SESAR cooperates with the equivalent US-American project *Next Generation Air Traffic Management System* (NextGen). The implementation of the new developed concepts and systems is envisaged in the final deployment phase after a successful validation.

### 1 Einleitung

Der europäische Luftraum gehört mit derzeit über 26 000 Flügen pro Tag, ungefähr 1,4 Milliarden Passagieren pro Jahr und einer sehr hohen Flughafendichte zu den belebtesten der Welt. Es zeichnet sich ab, dass der Flugverkehr in den nächsten Jahren weiter zunehmen wird. Es wird in den kommenden Jahren eine Steigerung um etwa 5 % pro Jahr erwartet.

Die Strukturen und Abläufe der Flugsicherungen basieren auf Konzepten aus früheren Zeiten, als die Anzahl der zu bewältigen Flüge deutlich geringer lag. Die technischen Systeme und Kommunikationswege entsprechen noch den Standards der 50er Jahre und sind überholt. Zudem erschwert der in viele kleine Bereiche unterteilte Luftraum

Europas ein einheitliches Management aller Luftfahrt-nutzer und führt zu hohen Kosten. In Europa wird das Luftverkehrsmanagement durch jeweils nationale Flugsicherungen und Eurocontrol geleistet. Zu den Aufgaben gehören die Kontrolle, das Management der Abläufe und der Kapazitäten vom Luftraum und der Flughäfen. Um die steigende Anzahl an Flügen weiterhin bewältigen zu können, wird eine Modernisierung des gesamten, europäischen Luftverkehrs angestrebt.

Die Initiative „*Single European Sky*“ (SES) beschreibt die Anstrengungen der Europäischen Kommission mit Unterstützung des Europäischen Parlaments den europäischen Luftraum unter dem Gesichtspunkt der Optimierung der Verkehrsströme neu zu strukturieren und dabei dessen Zersplitterung durch nationale Landesgrenzen und Inter-

essen aufzulösen, indem eine begrenzte Anzahl von funktionellen Luftraumblöcken (englisch *Functional Airspace Blocks*, FAB) geschaffen wird. Deutschland gehört zum „funktionellen Luftraumblock *Europe Central*“ (FABEC). Die Flugwetterdienste des FABEC mit den Ländern Niederlande, Belgien, Luxemburg, Frankreich, Schweiz und Deutschland entwickeln ein gemeinsames Betriebskonzept zur meteorologischen Versorgung dieses funktionalen Luftraumblocks mit seinen zivilen und militärischen Flugsicherungen. Einen stabilen Rahmen für eine erfolgreiche Zusammenarbeit bildet die *MET Alliance*, eine Kooperation europäischer Flugwetterdienste, die die für diesen funktionalen Luftraumblock benötigten meteorologischen Leistungen abstimmt.

Mit dem SESAR-Programm sollen die technischen und operativen Voraussetzungen für zukünftige Bedürfnisse der Luftfahrt an Kapazität, Effizienz, Sicherheit und Umweltverträglichkeit auf europäischer Ebene geschaffen werden. Das Programm verfolgt einen ergebnisorientierten, ganzheitlichen Ansatz, in dem es alle Nutzer des Luftraums und Mitwirkende in der Luftfahrt vereint. Experten von Flughäfen, Flugsicherungen, Luftfahrtindustrie, Wissenschaft, Luftfahrtgesellschaften, Aufsichts- und Verwaltungsbehörden arbeiten gemeinsam, um dieses Programm erfolgreich umzusetzen. Die Meteorologie als ein integraler Bestandteil des Luftverkehrsmanagements zielt in SESAR darauf ab, für Europa einheitliche Produkte zu erschaffen, die allen Nutzern gleichermaßen zur Verfügung gestellt werden. Die momentan zur Verfügung stehenden meteorologischen Produkte, meist auf nationaler Ebene entwickelt, zur Vorhersage flugmeteorologischer Phänomene sind heute durch eine größere räumliche und zeitliche Auflösung um ein Vielfaches genauer als der von der internationalen zivilen Luftfahrtorganisation (ICAO) im Annex 3 festgelegte Standard.

## 2 Übersicht und Struktur des SESAR-Programmes

In SESAR vereinen sich über 110 Partner mit mehr als 2 000 Experten um in etwa 300 Projekten die zur Vereinheitlichung des Europäischen Luftraumes notwendigen Konzepte und technischen Systeme zu entwickeln.

### 2.1 SESAR Joint Undertaking

Die *SESAR Joint Undertaking* (SJU), eine Kooperationsgemeinschaft von der Europäischen Kommission und Eurocontrol mit Beteiligung von 15 Unternehmen aus der Luftverkehrsbranche, koordiniert alle relevanten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dieses Programmes in Abstimmung mit dem *Air Traffic Management* (ATM) Master Plan und kontrolliert die Finanzierung. Der hohe Grad an Komplexität des gesamten SESAR-Programms, die Konzeptionierung des zukünftigen, europäischen ATM-Systems, welches auf einzelnen, mit einander agierenden ATM-Systembausteinen und gemeinsamen Stan-

dards basiert, ist eine große Herausforderung, der es sich zu stellen gilt. Daher unterstützt und fördert SJU die Involvierung der ATM-Nutzer und die Bildung effizienter Partnerschaften zwischen den verschiedenen Interessensvertretern.

### 2.2 Entwicklungsstufen

Das SESAR-Programm ist in drei Phasen unterteilt. Die Definitionsphase zur Erarbeitung des ATM-Masterplans wurde bereits 2008 vollendet. Der europäische ATM-Masterplan ist die Basis für eine zum richtigen Zeitpunkt, koordinierte und effiziente Umsetzung der in SESAR neu entwickelten Technologien und Arbeitsabläufe. Der ATM-Masterplan wird im Verlauf von SESAR nach Bedarf aktualisiert. So wurden die ersten vorteilhaften Ergebnisse aus SESAR in die neuste Auflage übernommen ebenso wie zum Beispiel die Zusammenarbeitsfähigkeit auf weltweiter Ebene insbesondere in Hinsicht mit der ICAO stärker gefördert werden soll.

Derzeit befindet sich das Programm in der Entwicklungsphase, die mit der Erschaffung der Prototypen sowie deren präoperationellen Validierung noch bis Ende 2016 andauern wird. Parallel beginnt bereits die Umsetzungsphase. In den nächsten Jahren, geplant bis 2020, sollen die erfolgreich entwickelten Systeme und Strukturen in den operationellen Betrieb übernommen und im Luftverkehrsmanagement europaweit umgesetzt werden. Bis die Systeme und Prozessabläufe in den verschiedensten Bereichen umfassend umgestellt und erneuert sein werden, wird allerdings ein längerer Zeitraum notwendig sein. Es sollen bis zum momentanen Projektende 2020 erste Entwicklungen verwirklicht werden, doch die Umsetzungsphase der in SESAR entwickelten Konzepte wird noch darüber hinaus andauern.

### 2.3 Arbeitspakete

Das SESAR Programm besteht aus 17 Arbeitspaketen, die sich hauptsächlich in die zwei Kategorien systembeziehungswise prozessorientiert einteilen lassen (Abb. 3-1). Jeder Flugabschnitt mit Flughafen, *Terminal Manoeuvring Area* (TMA) und *en-route*, aber auch die Auswirkungen auf das gesamte Netzwerk werden einzeln betrachtet. Außerdem gibt es noch übergreifende Arbeitspakete, die jeweils für die Systementwicklungen sowie die Erneuerung der Betriebsstrukturen von entscheidender Bedeutung sind. Das bestehende *System Wide Information Management* (SWIM) wird ebenfalls unter Betrachtung der technischen und inhaltlichen Komponenten modernisiert.

### 2.4 Operational Focus Areas

Außerdem werden Projekte nach ihren gemeinsamen Funktionen und Anwendungen in sogenannte „*Operational Focus Areas*“ (OFAs) gegliedert. Eine OFA gruppiert Forschungsprojekte, die alle Interesse an einem System

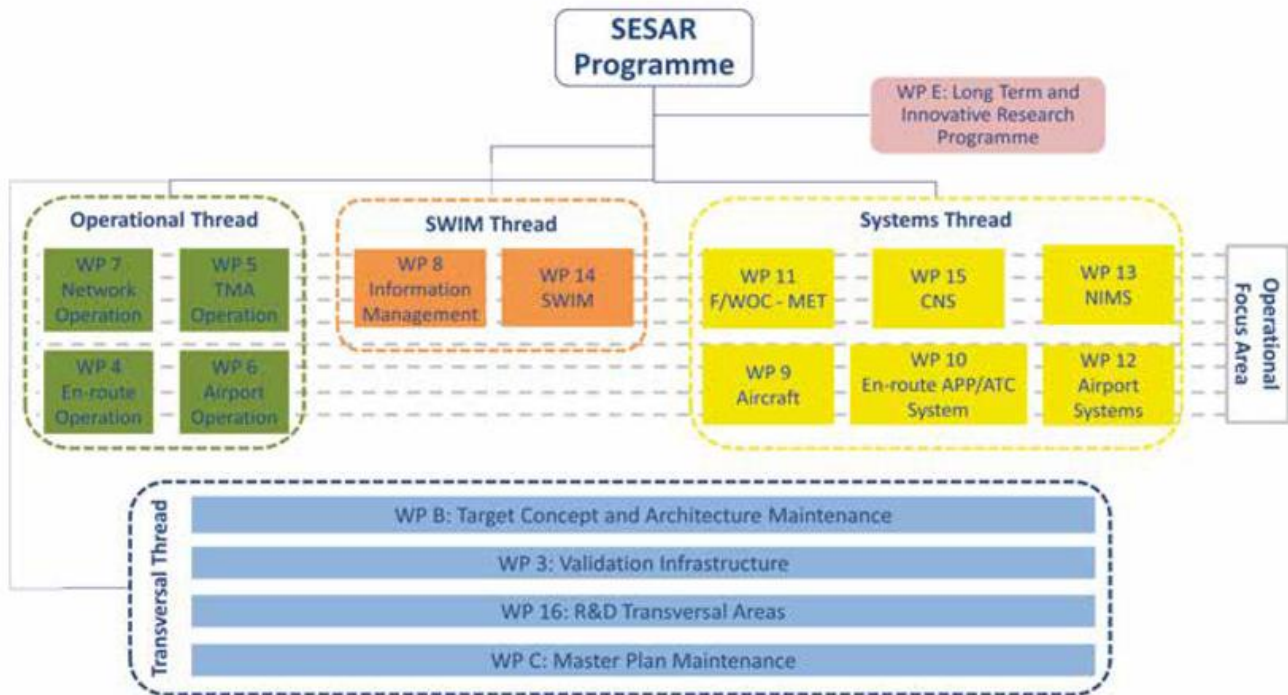


Abb. 3-1: SESAR-Projektstruktur mit Einteilung in Arbeitspakete. Aufbau und Abgrenzungen der Projekte und Arbeitspakete können sich im Verlauf des Programmes ändern.

oder Konzept haben, und stellt so sicher, dass die Entwicklungen in jeder Hinsicht kohärent sind. Darüber hinaus ermöglicht die enge Zusammenarbeit zwischen voneinander abhängigen Entwicklungsprojekten, die anvisierten Leistungssteigerungen in gemeinsamen Validierungskampagnen zu erreichen.

Die Tätigkeiten der OFAs und der beteiligten Projekte haben jeweils einen der drei Entwicklungsschritte des europäischen ATM-Masterplans zum Schwerpunkt:

- Step 1: Zeitbasierte Arbeitsabläufe (*Time Based Operations*),
- Step 2: Trajektorienbasierte Arbeitsabläufe (*Trajectory Based Operations*),
- Step 3: Leistungsorientierte Arbeitsabläufe (*Performance Based Operations*).

Zuerst steht die zeitliche Komponente im Vordergrund, das heißt eine höhere Effizienz durch kürzere Flugrouten zu erzielen. Im zweiten Schritt soll die Flugplanung auf Basis von 4D-Trajektorien erfolgen. Im abschließenden dritten Schritt werden die Systeme, Produkte und Strukturen unter dem Gesichtspunkt der Optimierung der Leistung des Gesamtsystems und unter Berücksichtigung aller individuellen Wünsche und zur Verfügung stehenden Informationen entwickelt.

### 2.5 Projektarten

Jedes Projekt ist einer von drei Hierarchiestufen zugeordnet und hat somit eine bestimmte Rolle innerhalb von SESAR zu erfüllen. Die sogenannten „Primary“-Projekte (Entwicklungsprojekte) haben den Schwerpunkt auf der

Entwicklung von bestimmten Anteilen des zukünftigen ATM-Systems. Diese Projekte sind miteinander kettenähnlich verbunden, indem sie von anderen Projekten notwendige Informationen erhalten und diese in der eigenen Entwicklung verarbeiten, um sie an das nächste Projekt weiter zu geben. „Transverse“- und „Federating“-Projekte geben durch ihre übergeordnete Rolle beziehungsweise projektübergreifenden Einfluss den Entwicklungsprojekten standardisierte Rahmenbedingungen für deren Entwicklungen vor. Ein operatives und technisches „Federating“-Projekt ist für jedes OFA identifiziert, um dessen Entwicklungsarbeiten zu koordinieren.

### 2.6 Produktvalidierung

Das SESAR-Programm setzt auf die lösungsorientierte, auf Nutzeranforderungen basierende Entwicklung kompatibler Konzepte und Systeme zwischen den beteiligten Akteuren in den ATM-Entscheidungsprozessen. Die entwickelten Prototypen werden als Abschluss der Entwicklungsarbeit in Validierungskampagnen auf ihr Potenzial zur Leistungssteigerung, ihre Qualität und Nutzbarkeit getestet. Die Validierung soll zeigen, dass die neuen Strukturen, Abläufe und Systeme das Erreichen der in SESAR gesetzten Ziele (siehe Abschnitt 4) ermöglichen. Für die Entscheidung, ob ein Produkt operationalisiert wird, ist durch die Validierung die Anwendbarkeit und die Qualität für die Nutzer zu bestätigen. Daher werden die meteorologischen Produkte bei gemeinsamen Kampagnen mit den operationellen Arbeitspaketen der ATM validiert. Es ist notwendig, dass Flughäfen ausgesucht werden, die über eine gute Ausstattung an meteorologische Beobachtungs- und Messsysteme

men verfügen. Um Aussagen zu Kapazitätsprognosen bewerten zu können, sind internationale, stark frequentierte Flughäfen geeignet, wie zum Beispiel die europäischen Flughafendrehkreuze wie Paris Charles de Gaulle, London Heathrow, Amsterdam oder Frankfurt. Die Auswirkungen auf das Netzwerk sollen durch den Network Manager in Brüssel validiert werden. An welchen Standorten die Validierungskampagnen tatsächlich stattfinden, wird sich im Laufe des Projektes herausstellen.

### 3 Wetter in SESAR: WP11.2 und TOPMET

Die Meteorologie wurde erst nachträglich in das SESAR-Programm integriert. Während die ersten Projekte bereits Ende 2009 ihre Arbeiten aufnahmen, gab es die Zusage für das meteorologische Arbeitspaket und die beteiligten Wetterdienste erst Anfang 2012. Die Meteorologie gehört zu den übergreifenden Arbeitspaketen, die wichtig für beide, die technischen sowie operativen, Komponenten sind, und hat mittlerweile den Status eines *“Federating Projects“*.

#### 3.1 EUMETNET-Konsortium

Die Wetterdienste sind im Rahmen eines internationalen Konsortiums unter der Federführung des *European Meteorological Networks* (EUMETNET) in einem eigenen Arbeitspaket (englisch *Work package*, WP) WP11.2 »Meteorological Information Services« im SESAR Programm eingebunden. Zu dem EUMETNET-Konsortium gehören neben dem Deutschen Wetterdienst (DWD) weiterhin die meteorologischen Dienste aus Frankreich (Météo France), Großbritannien (UK Met Office), Niederlande, Finnland, Schweden und Norwegen an. Außerhalb von EUMETNET gehören zum Konsortium noch die belgische Flugsicherung BelgoControl, das Nationale Luft- und Raumfahrtlaboratorium der Niederlande NLR und das französische Unternehmen „Thales Avionics“.

#### 3.2 Anwendungsspezifische Prototypen

Die meteorologischen Dienstleistungen werden in drei Kategorien, den sogenannten Prototypen *“Local“*, *“Sub-regional“* und *“Network“*, zusammengefasst und gemäß der Anfrage passend zum Beispiel für eine Flugtrajektorie aufbereitet. Diese Prototypen unterschieden sich in ihren Anwendungsgebieten und den dazu gehörenden räumlichen und zeitlichen Skalen der meteorologischen Produkte. Der Prototyp *“Local“* bezieht sich auf die Abläufe am Flughafen und im TMA. Die meteorologischen Phänomene, die während der Flugphase von Bedeutung sind, werden in Produkten innerhalb des Prototypens *“Sub-regional“* repräsentiert. Der Prototyp *“Network“* beinhaltet meteorologische Dienste, die insbesondere für die Flugplanung und das Luftverkehrsmanagement für ganz Europa entscheidend sind. Der DWD ist maßgeblich an der Entwicklung europaweit einheitlicher, meteorologischer Produkte zur Erkennung und Vorhersage flugmeteorologischer Gefahren beteiligt.

### 3.3 Aufgaben der Wetterdienste

WP11.2 teilt sich in zwei Projekte. Während WP11.2.1 *„Requirements for Met Information“* unter Leitung des UK Met Offices die Anforderungen des Flugverkehrsmanagements an die Meteorologie aufnimmt und darüber hinaus das Bewusstsein für die Bedeutung der Integration der Meteorologie in das ATM stärkt, werden die nach den Anforderungen entsprechende flugmeteorologischen Produkte und technischen Systeme im Projekt WP11.2.2, geleitet von Météo France, *„Met Information Systems, Development, Verification and Validation“* entwickelt, verifiziert um diese abschließend validieren zu können. Die Wetterdienste teilen sich die Aufgaben entsprechend ihrer Forschungsschwerpunktbereiche und bereits bestehender Vorhersagewerkzeuge. Das heißt, jeder der involvierten Wetterdienste hat die Verantwortung für die Harmonisierung und Entwicklung von europaweiten Produkten entsprechend seiner Expertise übernommen. Die zukünftige, operationelle Aufgabenteilung auf europäischer Ebene unter Beibehaltung von nationaler Souveränität muss innerhalb der Umsetzungsphase und darüber hinaus gemeinsam mit den EUMETNET-Mitgliedern, die nicht in SESAR involviert sind, diskutiert und geklärt werden.

#### 3.3.1 Zusammenarbeit mit Nutzern

Die in SESAR beteiligten europäischen Wetterdienste stellen sich gemeinsam der Aufgabe, ihre Flugwetterdienstleistungen, die weit über die internationalen Standards hinausgehen, innerhalb der ATM-Gemeinschaft bekannt zu machen, die Vorteile zu demonstrieren und die möglichen Anwendungsbereiche im ATM zu erläutern. Die Wetterdienste müssen das Bewusstsein der Anwender für die Vorteile schärfen, die die Nutzung von verbesserten Wettervorhersageprodukten auf die Flugplanung, die Abläufe am Flughafen und die Luftverkehrskontrolle erzielen kann. Das erfolgt durch viel Präsenz und Kommunikation bei Projekt- und OFA-Treffen, also eine gute Vernetzung des meteorologischen Arbeitspaketes mit den ATM-Projekten und den operationellen Arbeitsgruppen.

Es gilt diese Abläufe, Entscheidungsprozesse und die entstehenden Schwierigkeiten für die ATM in ungünstigen Wettersituationen zu verstehen, um die jeweiligen Nutzer zu unterstützen, konkrete Anforderungen zu formulieren. Das bedeutet, WP11.2 unterstützt die ATM-Projekte bei der Integration von MET-Informationen in deren Entwicklungskonzepte, assistiert bei der Erstellung von technischen Anforderungen an die Übertragung von meteorologischen Informationen sowie bei der Präzisierung der benötigten meteorologischen Inhalte.

#### 3.3.2 Entwicklung der meteorologischen Prototypen

Unter Berücksichtigung der zusammengetragenen Nutzeranforderungen entwickelt WP11.2 die spezifischen Inhalte sowie die technischen Komponenten der meteorologischen Prototypen und führt deren Validierung in Zusammenar-

beit mit den operationellen ATM-Arbeitsgruppen durch. Die Prototypen umfassen Analysen, Nowcasting und Kürzestfristvorhersagen von flugmeteorologischen Risiken wie zum Beispiel konvektive Ereignisse, Vereisung, Turbulenz und Winterwetter. Außerdem werden Produkte zur Unterstützung der Flugplanung, insbesondere von 4D-Trajektorien, bezogen auf das gesamte Netzwerk entwickelt. Flugrelevante Phänomene wie Weltraumwetter und Vulkanasche werden in den Konzepten durch bereits bestehende Produkte berücksichtigt, sind jedoch nicht direkter Bestandteil in der Entwicklungsphase, da es zu solchen Themen bei den verschiedenen nationalen Wetterdiensten meist keine eigenen Produkte gibt, die harmonisiert werden müssten.

Mit den Kernarbeiten zur Prototypenentwicklung unter der Leitung des DWDs wurde in 2012 begonnen. In einem ersten Schritt wurden die verschiedenen, vorhandenen Vorhersageprodukte der Projektpartner analysiert und deren Output harmonisiert. Die auf ein vereinbartes Gitter angepassten Vorhersagedaten sowie Ergebnisse von Beobachtungen und Messungen werden für die Verifikation genutzt. Die Verifikation der nationalen Vorhersageprodukte unterstützt die anschließenden Entwicklungsarbeiten für die bestmögliche Kombination zu einem gemeinsamen Produkt, das ein einheitliches, europaweites Bild der jeweiligen flugmeteorologischen Gefahr analysiert und für die Zukunft prognostiziert. Schwerpunkte der DWD-Beteiligung liegen im Bereich der Konvektion (Nowcasting und Ensemblevorhersage), Vereisungsdiagnose und -prognose und Turbulenzmodellierung. Außerdem gibt es Projekte zur verbesserten Nutzung von Beobachtungsdaten wie 3D-Radarkomposit, MODE-S- und E-AMDAR-Daten in Vorhersageprodukten.

### 3.3.3 Zentrale Wetterinformationsplattform

Es wird ein Wetterdaten-Server „4DWxC“, der sogenannte 4-Dimensional Weather Cube (4DWxC), entwickelt, der meteorologische Daten für die Nutzer zur Verfügung stellt und die ATM-Systeme mit den benötigten Inputparametern speist. Die Daten sollen nutzerspezifisch aufbereitet werden, zum Beispiel räumlich und zeitlich gefiltert entlang einer 4D-Flugtrajektorie. Die einzelnen Funktionen und technischen Anforderungen werden derzeit ermittelt und die technische Architektur konzeptionell erarbeitet. Dieser Server soll die Schnittstelle zwischen der Meteorologie und dem ATM bilden, um somit eine Verbindung zwischen den entwickelten MET-Produkten und SWIM herzustellen. Neben der Bereitstellung der harmonisierten europäischen und lokalen Produkte der nationalen Wetterdienste ist die Einbindung von privaten, kommerziellen Produkten noch zu klären.

Nachdem die Qualität der entwickelten, meteorologischen Produkte verifiziert ist, werden diese dann gemeinsam mit den modernisierten ATM-Systemen und -Prozessen innerhalb von SESAR validiert. Die meteorologischen Dienste von WP11.2 stehen mit verschiedensten OFAs in Verbindung, um vorteilhafte Kooperationen für erfolgsversprechende Forschungsaktivitäten und Validierungskampagnen

zu bilden. Dazu gehören bislang Kampagnen zur Qualitätsprüfung des Managements der Abläufe am Flughafen, der bodenbasierten Sicherheitsnetzwerke oder der Stafflungsprozesse im *En-route*-Bereich.

## 3.4 TOPMET

In einem weiteren SESAR-Projekt, genannt TOPMET, im Bereich „*Flight Trials and Demonstration Activities*“ beteiligt sich innerhalb eines EUMETNET-Konsortiums der DWD neben dem UK Met Office und Météo France seit Herbst 2012 innerhalb eines EUMETNET-Konsortiums und steuert das meteorologische Produkt ADWICE (*Advanced Diagnosis and Warning system for aircraft ICing Environments*) zur Diagnose und Prognose von Vereisung bei. Dieses und weitere meteorologische Produkte werden in einer Testphase von der französischen Flugsicherung DSNA und von *Brussels Airline*-Piloten während regulärer Flüge validiert. Zunächst wird die technische Infrastruktur für die Datenübertragung der meteorologischen Produkte in das Cockpit von den Projektpartnern „Thales Air Systems“ und „Thales Avionics“ entwickelt. Gleichzeitig müssen die meteorologischen Produkte an die technischen Anforderungen angepasst werden. Die Testphase wird von Januar bis Juni 2014 stattfinden und beinhaltet neben Flugstrecken innerhalb Europas auch interkontinentale Flüge nach Nordamerika und Afrika.

## 4 Ziele und erste Erfolge

### 4.1 Ziele des SESAR Programmes

Die Initiative SES dient der Modernisierung des gesamten europäischen Luftverkehrsmanagements und der Defragmentierung des europäischen Luftraumes. Das heißt, die Ziele liegen im ATM-Bereich und die Verbesserung der meteorologischen Produkte ist Mittel zum Zweck, diese zu erreichen. SESAR verfolgt das Konzept der *Business-Trajectory*, das auf die Bestimmung der optimalen Flugroute für jeden einzelnen Flug zielt, um die Effizienz des gesamten Netzwerkes zu steigern. Das Programm ist auf die Defragmentierung des europäischen Luftraumes und die Kombinierung von Ressourcen ausgerichtet. Eine Vereinheitlichung des europäischen Luftverkehrsmanagements soll durch die Harmonisierung von Abläufen und Entscheidungsprozessen sowie durch die Synchronisierung von zur Verfügung stehenden Informationen der verschiedenen Akteure geschaffen werden. Diese Vorhaben sollen erreichen, dass die Kapazität und die Sicherheit erhöht und die Umweltbelastung (zum Beispiel Lärm) sowie die Kosten für das ATM reduziert werden.

Die Umstrukturierung des europäischen ATMs strebt vier konkrete, messbare Ziele an:

1. Verdreifachung der Kapazität,
2. Erhöhung der Sicherheit um den Faktor 10,
3. Verminderung der Umwelteinflüsse pro Flug um 10 %,
4. Reduzierung der Kosten für das ATM um 50 %.

Im Durchschnitt bedeutet das umgerechnet auf einen Flug, dass insgesamt acht bis 14 Minuten Flugzeit und 300 bis 500 kg Kerosin, entsprechend 945 bis 1575 kg CO<sub>2</sub> eingespart werden.

#### 4.2 Ziele der Wetterdienste

Da die bisherigen nationalen Produkte auf unterschiedlichen Modellen und Modellketten basieren, ist die Harmonisierung der Vorhersageprodukte, um ein vereinheitlichtes, in sich konsistentes Bild der Wetterlage zu erhalten, eines der Hauptziele innerhalb von SESAR für die Wetterdienste. Die Wetterinformationen sollen für alle ATM-Nutzer gleichermaßen zugänglich sein. Die Datenbereitstellung erfolgt über den „4DWxC“ in gemeinsam festgelegten, technischen Standards, die kompatibel mit den ATM-Systemen sind. Es ist das Ziel der Wetterdienste zu zeigen, dass durch die Verwendung von hochaufgelöster, nutzerspezifischer MET-Produkte eine Steigerung der ATM-Leistung erreicht werden kann und somit die angestrebten Verbesserungen (siehe Abschnitt 4.1) möglich sind.

#### 4.3 Erster 4D-Trajektorien basierter Flug

Am 10. Februar 2012 wurde ein erster Testflug auf Basis eines vierdimensionalen (4D) Flugtrajektorienmanagements mit einem A320 von Toulouse über Kopenhagen nach Stockholm und wieder zurück erfolgreich durchgeführt (Abb. 3-2).

Das 4D-Trajektorienmanagement kombiniert konventionelle dreidimensionale Daten der Flugroute mit einer geschätzten Ankunftszeit für das Flugzeug an Wegpunkten seiner Route. Die Zuordnung der Zeit zu Raumpunkten entlang von Flugtrajektorien eines einzelnen Flugzeuges und zukünftig aller Flugzeuge von Beginn an für die gesamte Strecke in einer verkehrsreichen Zone ermöglicht dem System die Flugzeugpositionen präzise und vorhersagbar darzustellen. Dieses erste 4D-Trajektorienmanagementsystem (*Initial 4D trajectory management, I-4D*) bestimmt also



Abb. 3-2: Flugstrecke des Testfluges auf Basis einer vierdimensionalen Flugtrajektorie und einige der durchflogenen Lufträume (von Südwest nach Nordost: MUAC, Dänemark, Südschweden).

bereits frühzeitig eine geeignete, zeitliche Reihenfolge für die sich einem Wegpunkt annähernden Flugzeuge. Es erfolgt ein automatischer 4D-Datenaustausch zwischen dem Flugmanagementsystem und den Bodensystemen. Nach deren Abstimmung wird jedem Flugzeug ein bestimmtes Zeitfenster zugewiesen, an dem es diesen Wegpunkt passieren kann. Die Berücksichtigung der zeitlichen Komponente dient dazu, horizontale Ausweichmanöver oder das Verlassen der Reiseflughöhe zu verhindern. Insgesamt soll eine direkte, kürzere Flugstrecke für das Flugzeug erzielt werden. Die genauere, frühzeitige Kenntnis von Flugzeugpositionen erhöht außerdem die Sicherheit des einzelnen Fluges und des gesamten Luftverkehrs und reduziert die Belastung der Fluglotsen.

Während des Testfluges wurde beim Durchfliegen des EUROCONTROL *Maastricht Upper Air Control Centre* (MUAC)-Gebietes in Abstimmung zwischen den Flugzeug- und Bodensystemen ein Zeitfenster für einen am Kopenhagener Flughafen nahegelegenen Wegpunkt festgelegt. So konnte der Flug anschließend im dänischen Luftraum einen optimierten, stufenlosen Anflug auf Kopenhagen ohne Konflikte mit anderen Flugzeugen demonstrieren. Der Testflug hat gezeigt, dass das 4D-Trajektorienmanagement das Fliegen auf effizienteren Flugrouten und den optimalen Landeanflug auch in Gebieten hoher Verkehrsdichten ermöglicht. Die Datenverbindung zwischen Flugzeug und Kontrollzentren beziehungsweise Flughäfen wurde erfolgreich verifiziert. Außerdem konnte die Darstellung von Informationen bei den Fluglotsen und den Piloten sowie der Einfluss auf deren Reaktionen bewertet werden.

Die Entwicklung von I-4D ist ein grundlegender Bestandteil des SESAR-Programmes, um Flüge berechenbarer und planbarer zu koordinieren und zu leiten. Die effizienteren Routen erhöhen die Kapazität des Start- und Zielflughafens sowie des gesamten europäischen Luftraumes. Umweltaspekte können und sollen zukünftig in die Planung und Berechnung der Flugrouten einbezogen werden, und somit zum Beispiel die Lärmbelastung reduzieren. I-4D wird als ein Schlüsselement im Übergang von den derzeitig steif festgelegten Flugrouten zu optimierten Flügen im zukünftigen Europäischen Luftraum gesehen.

Die Meteorologie wurde bei dem Testflug nicht berücksichtigt, doch soll sie zukünftig als Einflussfaktor in das System integriert werden. Zur Unterstützung von 4D-Trajektorienprojekten wurde eigens ein Teilprojekt im WP 11.2.2 geschaffen. Somit sollen frühzeitig notwendige Regulierungen aufgrund von Wetter bestimmt werden und die Flugroutenplanung bei eingeschränkter Nutzung des Luftraumes erleichtert werden.

## 5 NextGen: SESAR-Pendant in den USA

NextGen ist das von der US-Bundesbehörde der zivilen Luftfahrt (FAA) koordinierte, äquivalente Programm zu SESAR in den USA. NextGen soll die derzeit bodengestützte Sicherung des Flugverkehrs in ein satellitenbasiertes ATM-System umstrukturieren, um die zukünftigen Anforderungen an die Luftfahrt zu erfüllen und Verzögerungen in der Luft oder an Flughäfen zu vermeiden. Digitale Kommunikationssysteme, weltraumgestützte Navigation und ganzheitliche Überwachung des Luftraumes und ein auf ein Netzwerk fixierter Informationszugang sollen in NextGen das US-Lufttransportsystem modernisieren. Synchronisierter Informationsgrad, zeitlich optimierte Abläufe am Boden und kurze direkte Flugstrecken erhöhen die Effizienz eines Flugzeuges und verringern somit die Kosten pro Flug. Verspätungen zu minimieren und positive Einflüsse für Umwelt und Wirtschaft durch Reduzierung von Lärm, Treibstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die Erhöhung von Sicherheit und Kapazität zu erzielen, sind in den USA ebenso von großer Bedeutung wie in Europa.

Die Europäische Kommission, SJU, EUROCONTROL und die FAA kooperieren in Hinblick auf die Entwicklung eines zukünftigen ATM-Systems für die zivile Luftfahrt. Das bedeutet, die Zusammenarbeit ist in das SESAR-Programm integriert. Die Kooperation erfolgt vor allem in den Bereichen des Informationsmanagements, Flugroutenmanagement und die Kompatibilität in den Anwendungen und Systemen für die Flugzeug-Flugzeug- sowie für die Flugzeug-Boden-Kommunikation. Außerdem gibt es transversale Aktivitäten, die beide Programme betreffen aber weder den operativen noch den technischen Entwicklungen eindeutig zuzuordnen sind.

### 5.1 Wetter in NextGen: Common Support Services

Die richtigen Informationen zur richtigen Zeit an die richtige Person zu liefern, ist die Grundlage für gemeinschaftliche Entscheidungsprozesse (engl. *Collaborative Decision Making*, CDM). Daher bildet der Datenaustausch ein Schlüsselement in NextGen. Die Wetterinformationen werden innerhalb von NextGen im sogenannten *Common Support Services-Weather* (CSS-Wx)-Projekt organisiert und die benötigten Systeme entwickelt. CSS-Wx stellt standardisierte, von NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) oder anderen Anbietern flugmeteorologischer Informationen erzeugte, meteorologische Informationen durch den NextGen Wetterserver für die Nutzer bereit. Nach Einführung sollen manche bisherigen, veralteten Wetterinformationssysteme stillgelegt werden.

Der FAA und den Luftraumnutzern wird somit über den NextGen-4DWxC-Zugang zu Informationen zu einem einheitlichen Bild der flugmeteorologischen Bedingungen über SWIM ermöglicht. Fluglotsen, Piloten und Flugplanern erhalten in NextGen die nötigen Mittel und Informationen, um flexibel, dynamisch und proaktiv Wetter und andere Gefahren zu identifizieren und zu umgehen. Wet-

terinformationen werden in CDM-Systeme integriert, um die Qualität der Entscheidungen der Fluglotsen zu erhöhen und deren Arbeitsbelastung in Schlechtwettersituationen zu reduzieren. Außerdem sieht NextGen die Weitergabe von Echtzeitdaten unter anderem von Wetter und Positionen von Flugzeugen beziehungsweise Fahrzeugen im gesamten nationalen Luftraum vor.

Zusammengefasst sieht man im Vergleich der beiden Forschungsprogramme große Ähnlichkeiten vor allem in den zu erreichenden Zielen. Doch während NextGen das Gesamtsystem als Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten sieht und die Meteorologie von Anfang an einen hohen Stellenwert hatte, konzentriert sich SESAR auf die Bestimmung optimierter, einzelner Flugtrajektorien und die Meteorologie gewinnt erst zunehmend an Beachtung. Außerdem kämpft Europa mit größeren Schwierigkeiten bei der Harmonisierung und Vereinheitlichung durch die bislang vielen, kleinen Lufträume aufgrund der verschiedenen nationalen Staaten und politischen Grenzen.

## 6 Ausblick

Der erste I-4D-Testflug deutet darauf hin, dass die Zusammenarbeit der SESAR-Mitglieder echte Veränderungen im ATM erzielen kann. Davon wird nicht allein die Industrie, sondern kann auch die Gesellschaft insgesamt profitieren. Um die Forschungsarbeiten und Testphasen allerdings in die Realität flächendeckend und dauerhaft zu übernehmen, verlangt es nach einem strukturierten Konzept zur Implementierung von den neu entwickelten Systemen und Prozessabläufen. Dies erfolgt in der SESAR-„Deployment“-Projektphase. Schlüsselemente der SESAR-Realisierung sind sogenannte „Common Projects“ (CPs). Für die EUMETNET-Projektpartner ist die Umsetzungsphase ebenso von strategischer Bedeutung wie das jetzige Entwicklungsprojekt, da hier die zukünftigen Leistungen an das ATM definiert werden. EUMETNET hat im Mai 2012 beim SJU erreicht als Interessensgruppe für den *SESAR Deployment Manager* anerkannt und als Partner bei der Koordination der Umsetzungsprojekte für die Flugmeteorologie beteiligt zu werden. Das ist eine notwendige Voraussetzung, um an der Ausschreibung des *SESAR Deployment Managers* teilzunehmen und später CPs zur Implementierung von Prototypen initiieren zu können. Das Umsetzungsprogramm legt dann fest, welche CPs durchgeführt, also wie, wann, welche Entwicklungen verwirklicht werden.

Die flugmeteorologischen Dienstleistungen der Wetterdienste werden sich mit den Entwicklungen von SESAR verändern. Es zeichnet sich schon jetzt die Wichtigkeit ab, die individuellen Ansprüche der Nutzer an Quantität, Qualität und Darstellungsform der Wetterinformationen zu erfüllen und dabei eine einheitliche, konsistente Vorhersage der zukünftigen Wettersituation widerzuspiegeln. In wieweit sich die Umwandlung des ATM zu einem SES auf die Strukturen der Wetterdienste auswirkt, wird sich

in den nächsten Jahren zeigen. In jedem Fall ist eine enge, gemeinschaftliche Zusammenarbeit der nationalen Wetterdienste notwendig, um den Aufgaben, die SESAR an die Meteorologie stellt, gerecht zu werden und um die gesetzten Ziele zu erreichen.

### Literaturhinweise

Für den interessierten Leser finden sich weitere Informationen zu:

*DWD*: <http://www.dwd.de/luftfahrt> -> *Nationale u. Internationale Projekte* -> *SESAR*

*SESAR Joint Undertaking*: <http://www.sesarju.eu/newspress>: Press releases, Multimedia gallery postings and News, [http://en.wikipedia.org/wiki/SESAR\\_Joint\\_Undertaking](http://en.wikipedia.org/wiki/SESAR_Joint_Undertaking).

*Functional Airspace Blocks*: <http://www.eurocontrol.int/dossiers/fabs>, [http://www.fab-europe-central.eu/fab/internet\\_2010/englisch/start/index.html](http://www.fab-europe-central.eu/fab/internet_2010/englisch/start/index.html).

ICAO: Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation, Meteorological Service for International Air Navigation, Edition 16, July 2007, [http://www.wmo.int/pages/prog/www/ISS/Meetings/CT-MTDCF-ET-DRC\\_Geneva2008/Annex3\\_16ed.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/www/ISS/Meetings/CT-MTDCF-ET-DRC_Geneva2008/Annex3_16ed.pdf).

*ATM Master Plan*: European ATM Master Plan The Roadmap for Sustainable Air Traffic Management, Edition 2, October 2012, <https://www.atmmasterplan.eu/>.

SESAR-Arbeitspakete: <http://www.sesarju.eu/programme/workpackages>.

4D-Trajektorienmanagement: <http://www.sesarju.eu/programme/highlights>, Video zum Testflug.

NextGen: <http://www.faa.gov/nextgen/>.

M. KERSCHBAUM

# 4 Wetter im Luftverkehrsmanagement

## Weather and Air Traffic Management

### Zusammenfassung

Trotz aller technischen Entwicklungen hat das Wetter nach wie vor einen sehr großen Einfluss auf die sichere, pünktliche, effiziente und nachhaltige Abwicklung des Flugverkehrs. Im Luftverkehrsmanagement müssen die Auswirkungen des Wetters in vielfältigster Weise berücksichtigt werden, die operationelle Flugverkehrskontrolle beschäftigt sich hauptsächlich mit der Vermeidung von Wettergefahren bei gleichzeitig möglichst wirtschaftlicher und umweltschonender Abwicklung des Flugverkehrs. Auch in den taktischen ATM-Planungsprozessen müssen das Wetter und seine Abhängigkeiten auf den Flugverkehr geeignet behandelt werden. Daraus werden dann auch die meteorologisch relevanten zukünftigen Entwicklungen in SES (*Single European Sky*) und SESAR (*Single European Sky Air Traffic Management Research*) im europäischen Luftverkehrsmanagement abgeleitet.

### Abstract

Despite all technical developments weather still has significant influence on the safe, punctual, efficient and sustainable air traffic control. Air traffic management has to consider weather impacts of all kinds, while operational air traffic services deal with the avoidance of imminent weather hazards simultaneously directing air traffic in the most economical and environmentally friendly way. Consequently, all tactical and pretactical ATM-planning processes have to consider weather impacts on aviation in a suitable manner when deriving future meteorologically relevant developments for European air traffic management in SES (*Single European Sky*) and SESAR (*Single European Sky Air Traffic Management Research*).

### 1 Einleitung

Der aktuell bereits recht dichte Flugverkehr kann nur durch das optimale Zusammenwirken von Fluglinien, Flughäfen und Flugsicherungen – auch **Air Traffic Management** (ATM)-System genannt – bewältigt werden. In diesem Artikel werden die Auswirkungen des Wetters auf das komplexe ATM-System betrachtet, besonderes Augenmerk wird dabei auf die Rolle der Flugsicherungen gelegt. Die Zusammenstellung der relevanten Abläufe ist sicherlich nicht vollständig, bei den komplexen ATM-Prozessen mussten teilweise auch Vereinfachungen vorgenommen werden.

In Abschnitt 2 werden die Grundaufgaben der Flugsicherung und deren Wetterabhängigkeit kurz skizziert, nachdem es sich hier um einen Bereich mit komplexen Verfahren und vielen Regeln handelt, werden auch die nationalen und internationalen Rahmenbedingungen näher beschrieben. Kapitel 3 gibt eine ganz kurze Übersicht über Sicht- und Instrumentenflugregeln und die daraus abgeleiteten Luftraumstrukturen. Danach werden in Kapitel 4 die Wetterabhängigkeiten der verschiedenen Organisationseinheiten im Luftverkehrs-

management, in Kapitel 5 die Wettereinflüsse auf die in einer Flugsicherung ablaufenden Planungsprozesse untersucht. Die Wetter-Tools eines Fluglotsen-Arbeitsplatzes und einige spezielle Wettervorhersagen für das Luftverkehrsmanagement werden dann in Kapitel 6 beschrieben. Die Kapitel 2 bis 6 geben eine Übersicht über den aktuellen Status 2013 zu diesem Thema, ein kurzer Ausblick auf die nach Meinung des Autors wichtigsten zukünftigen Entwicklungen wie **Single European Sky** (SES) und das damit verbundene Entwicklungsprogramm SESAR soll diese Übersicht über Wetter im Luftverkehrsmanagement abrunden.

In der Flugsicherung wird bis auf wenige Ausnahmen die englische Sprache verwendet, oft auch noch gespickt mit vielen Abkürzungen, daher gibt es für viele Ausdrücke keine wirklich passende deutsche Übersetzung. Es wird zwar beim ersten Auftreten einer Abkürzung im Text immer die Langform und wenn möglich auch eine deutsche Übersetzung eingefügt, am Ende des Artikels werden die Abkürzungen in einem Verzeichnis noch einmal zusammengefasst. Die für diese Zusammenstellung verwendeten Internet-Quellen werden den Abbildungen, Tabellen und Literaturhinweisen beigelegt.

## 2 Aufgaben einer Flugsicherung

Die Organisation und Kontrolle des zivilen Luftverkehrs wird in den einzelnen Staaten durch die entsprechenden Luftfahrtgesetze geregelt. Wahrgenommen werden diese hoheitlichen Aufgaben von den Flugsicherungsunternehmen, oft auch *Air Navigation Service Provider* oder kurz auch ANSP genannt, die militärische Überwachung des Luftraums wird üblicherweise von den entsprechenden militärischen Stellen übernommen.

Die wichtigsten Ziele für ein ATM-System kann man mit Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Pünktlichkeit und Nachhaltigkeit zusammenfassen. Bei genauerer Betrachtung ist allen Themenbereichen eine mehr oder minder hohe Wetterrelevanz gemeinsam.

- Systemsicherheit („Safety“) hat natürlich oberste Priorität, 2011 gab es in der europäischen kommerziellen Luftfahrt keinen Unfall mit direkter ATM-Beteiligung. Die wichtigste Aufgabe des Flugverkehrsleiters (*Air Traffic Controller – ATCO*) ist die Gewährleistung der Sicherheitsabstände zwischen den Flugzeugen. Die „Staffelung“ genannten Sicherheitsabstände betragen in Kontinentaleuropa bei der Horizontalstaffelung mindestens 5 Nautische Meilen (NM; etwa 9 km) seitlich, nach vorne und hinten; bei der vertikalen Staffelung mindestens 1000 Fuß (300 m), nur im Anflug auf hochfrequentierte Flughäfen können diese Abstände bei optimalen Wetterverhältnissen auch auf bis zu unter 3 NM horizontal verringert werden (siehe Abbildung 4-1).
- Die optimale Behandlung des Wetters ist ebenfalls eine Grundvoraussetzung für möglichst effizientes Luftverkehrsmanagement, was sich vor allem in optimierten Flugrouten und möglichst kurzen Flugzeiten äußert, dadurch können auch die Umwelteinflüsse so gering wie möglich gehalten werden. Um das zu erreichen, muss die Flugsicherung die entsprechenden Kapazitäten an Personal für die Flugverkehrskontrolle zur Verfügung stellen. Gemessen wird die Performance einer Flugsicherung hauptsächlich über Auswertungen der anfallenden Verspätungen.
- Der größte Beitrag eines Wetterdienstes zur *Cost-Efficiency* einer Flugsicherung liegt in der Erbringung der Wetterdienstleistungen mit möglichst optimalen Pro-



Abb. 4-1: Die wichtigste Aufgabe des Flugverkehrsleiters ist die Gewährleistung der horizontalen und vertikalen Sicherheitsabstände („Staffelung“ = rote Pfeile) (<http://www.austrocontrol.at>).

dukten, die eine effiziente Einsatzplanung ermöglichen, bei möglichst geringen Kosten.

Allgemein gesprochen hat also die Flugsicherung für die Überwachung des Luftraums und die sichere Abwicklung des Flugverkehrs zu sorgen, der jeweilige Pilot hat die Verantwortung, für die Sicherheit seines Fluges zu sorgen. Diese Zuordnung der Verantwortungen kann über den Begriff des *Controlled Flight into Terrain* (CFIT, englisch für „gesteuerter Flug gegen Geländehindernisse“) verdeutlicht werden. Von einem CFIT wird gesprochen, wenn ein intaktes Luftfahrzeug von einem ausgebildeten Piloten ins Gelände geflogen wird, während dieser sich des bevorstehenden Zusammenstoßes nicht bewusst ist. Sehr oft ist auch schlechtes Wetter eine der Hauptursachen in einer derartigen kausalen Unfallkette ([http://www.skybrary.aero/index.php/Controlled\\_Flight\\_Into\\_Terrain](http://www.skybrary.aero/index.php/Controlled_Flight_Into_Terrain)). In diesem Fall trägt der Pilot für diesen Unfall die Verantwortung. Die Flugsicherung versucht zwar alles, um den Piloten auf solche Gefahren hinzuweisen, ist aber eigentlich nicht zuständig für die Separation vom Terrain. In die Wetterpraxis umgelegt bedeutet diese klare Zuordnung der Verantwortung, dass ein Pilot immer die letzte Entscheidung für sein Handeln trifft, zum Beispiel über das Um- oder Durchfliegen eines Gewitters. Der zuständige Fluglotse muss dann die Umsetzung dieser Entscheidung unter Berücksichtigung und Aufrechterhaltung eines sicheren Flugsicherungssystems ermöglichen. Diese Aufteilung der

| Airspace class      | A***B C D E   | F G   |   |
|---------------------|---|---|---|
|                     |   | ABOVE 900 m (3 000 ft) AMST or above 300 m (1 000 ft) above terrain whichever is the higher | At and below 900 m (3 000 ft) AMST 03 300 m (1 000 ft) above terrain, whichever is the higher |
| Distance from cloud | 1 500 m horizontally<br>300 m (1 000 ft) vertically                               | Clear of cloud and in sight of the surface  |   |
| Flight visibility   | 8 km at and above 3 050 m (10 000 ft) AMSL<br>5 km below 3 050 m (10 000 ft) AMSL | 5 km**  |   |

Tab. 4-1: Zusammenstellung der notwendigen Sichtflugbedingungen für die einzelnen Luftraumklassen (siehe Abbildung 4-2) aus ICAO Annex 2 – Rules of the Air.

Verantwortlichkeiten gilt natürlich für den Umgang mit allen relevanten Wetterphänomenen.

### 3 Gesetzliche Regelungen

Die Internationale Zivilluftfahrt-Organisation (ICAO) legt weltweit die Vorschriften für die Durchführung der zivilen Luftfahrt fest, die meteorologischen Produkte und Services sind beispielsweise im ICAO Annex 3 geregelt. Die legislative Umsetzung dieser Vorschriften wird dann europaweit durch EU-Verordnungen sowie die nationale Gesetzgebung vorgenommen. Exekutiert werden diese Vorschriften dann einerseits durch die jeweiligen staatlichen Behörden sowie auf der operativen Seite durch die Flugsicherungen. Eine Fluginformationsregion (FIR) bezeichnet den Luftraum, in dem eine Flugsicherung ihre Dienstleistungen anbietet, im Wesentlichen sind das die Flugsicherungs-, Informations-, Such- und Rettungsdienste für alle bekannten Flüge.

Für den reibungslosen Ablauf des Flugverkehrsmanagements müssen nun alle Beteiligten bestimmte Regeln einhalten.

#### 3.1 Sichtflug- und Instrumentenflugregeln

Als Sichtflug bezeichnet man einen nach Sichtflugregeln (VFR, *Visual Flight Rules*) durchgeführten Flug. Konkret bedeutet das abhängig vom verwendeten Luftraum Flugsichten von zumindest 1,5 km und Mindestabstände von Wolken von horizontal 1,5 km und vertikal von mindestens 300 m oder 1000 ft (siehe Tabelle 4-1). Im Gegensatz

dazu benötigt ein Flug nach Instrumentenflugregeln (IFR, *Instrument Flight Rules*) entsprechend instrumentierte Luftfahrzeuge, die für die Navigation notwendige Bodeninfrastruktur und speziell für IFR ausgebildete und lizenzierte Piloten.

Abhängig von den verwendeten Regeln leiten sich nun die dafür notwendigen meteorologischen Bedingungen ab. Sichtflug benötigt VMC (*Visual Meteorological Conditions* - Sichtflugbedingungen) oder zumindest Special VMC, für Instrumentenflüge reichen IMC (Instrumentenflugbedingungen). Hier gibt es dann nur Behinderungen durch etwaige Wettergefahren sowie Einschränkungen bei Start und Landung, die sowohl von den veröffentlichten Anflugverfahren als auch von der Ausrüstung von Flughafen und Luftfahrzeug sowie der Ausbildung der Piloten und etwaiger *Company Limits* bestimmt werden.

Die verwendeten Regeln gestalten auch die notwendigen meteorologischen Services. Für Sichtflug sind genaue Aussagen unter anderem über Sichtweite und Bewölkung notwendig, IMC-Bedingungen erfordern mehr die Aussagen über Gefahrenpotentiale wie zum Beispiel Vereisungszonen oder eingebettete Gewitter. Eine genauere Beschreibung der meteorologischen Bedingungen und Vorhersagen für IFR-Starts und Landungen wird in Kapitel 4 über die ATS-Einheiten gegeben. Luftraumstruktur

#### 3.2 Luftraumstrukturen

Zur Erreichung der in Abschnitt 2 definierten Ziele ist die möglichst effiziente Bewirtschaftung der zur Verfügung

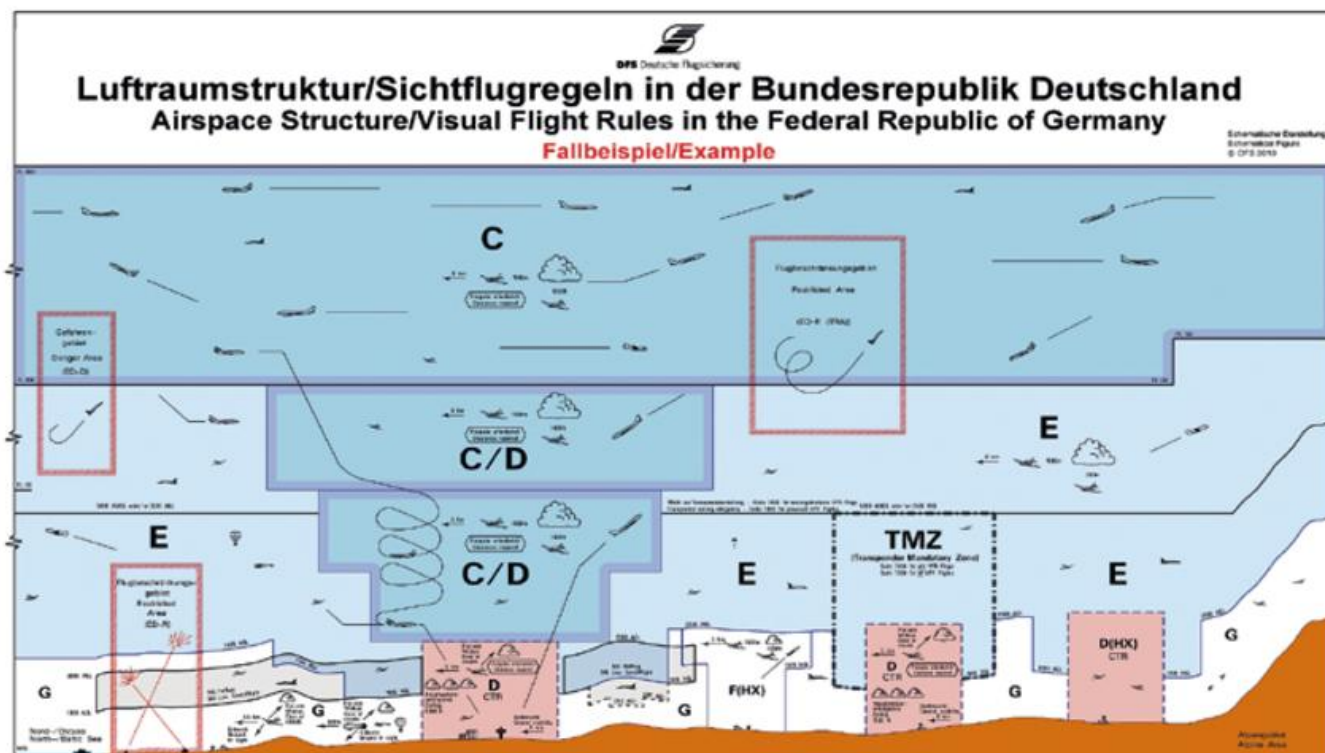


Abb. 4-2: Die in Deutschland gültigen Regeln zur Luftraumstruktur sind im Wesentlichen auch in Österreich und der Schweiz anwendbar ([http://dfs.de/dfs/internet\\_2008/module/grundkurs\\_flugsicherung/deutsch/grundkurs\\_flugsicherung/system\\_flugsicherung/luftrauminfo\\_struktur/index.html](http://dfs.de/dfs/internet_2008/module/grundkurs_flugsicherung/deutsch/grundkurs_flugsicherung/system_flugsicherung/luftrauminfo_struktur/index.html)).

stehenden Lufträume notwendig. Die ICAO hat eine Luftraumstruktur mit unterschiedlichen Luftraumklassen von A bis G festgelegt. Die Unterscheidung erfolgt grob durch die Art der Kontrolle dieser Lufträume (kontrolliert/unkontrolliert) und beinhaltet weitgehende Richtlinien für den Durchflug dieser Bereiche, wie Höchstgeschwindigkeit, Mindestsichtweiten (Flug- und Bodensicht), Erdsicht und minimale Wolkenabstände.

Eine Übersicht der Deutschen Flugsicherung DFS (Abbildung 4-2) beschreibt die in Deutschland, Österreich und der Schweiz verwendeten Luftraumklassen. Im Wesentlichen unterscheidet man hier zwischen kontrolliertem und nicht kontrolliertem Luftraum:

- Der kontrollierte Luftraum setzt sich aus den Luftraumklassen C, D und E zusammen, das heißt IFR- und (meist) auch VFR-Flüge werden gestaffelt. Für den Einflug in diese Lufträume sind Freigaben erforderlich, Verkehrsinformationen werden zur Verfügung gestellt.
- Die Luftraumklassen F und G bilden den nicht-kontrollierten Luftraum. Hier wird somit nicht gestaffelt, Verkehrsinformationen über anderen Flugverkehr werden aber soweit möglich erteilt.
- Die horizontale und vertikale Verschachtelung der Lufträume leitet sich aus der umgebenden Topographie sowie den Anforderungen der Flugsicherung ab (inklusive militärische Aktivitäten). Dann gibt es noch spezielle Gebiete um die Flughäfen.
- Die Kontrollzone (CTR) entspricht im Wesentlichen der Luftraumklasse D (rosa Gebiet in Abbildung 5-2).
- Die *Terminal Manoeuvring Area* (TMA) ist der Bereich der Klasse C/D und speziell nach den Anforderungen von An- und Abflug entworfen.

#### 4 ATS-Einheiten

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Aufgaben der *Air Traffic Services* (ATS) und ihre Organisationseinheiten kurz beschrieben und auf mögliche Verbindungen zu Wetterdiensten oder auch Abhängigkeiten vom Wetter hingewiesen.

Ein Flug im kontrollierten Luftraum (Luftraumklassen C, D und E) beschäftigt mehrere ATC-Einheiten. Das Rollen am Flughafen wird von *Ground Control* (GND) kontrolliert. Seine Startfreigabe bekommt ein Flug von *Tower Control* (TWR). Das Abfliegen einer bestimmten Abflugroute kontrolliert *Approach Control* (APP). Den „En Route“-Verkehr überwachen ein oder mehrere *Area Control Center* (ACC). Anflug, Landen und Rollen bis zur Parkposition kontrollieren dann wieder APP, TWR und GND (Abbildung 4-3). Die Übergabe von einer Einheit zur nächsten macht für den Piloten auch den Wechsel zur nächsten Funkfrequenz notwendig. TWR und APP werden oft auch zu dem Begriff „Terminal“ zusammengefasst, da ja eine recht enge Koordination von Anflug und Landung notwendig ist und oft auch von denselben oder zumindest ähnlichen Faktoren beeinflusst wird.

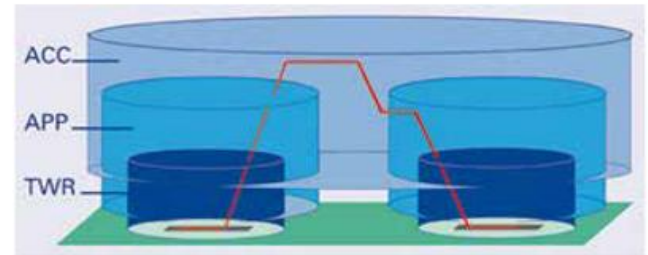


Abb. 4-3: Die einzelnen Phasen eines Fluges werden von verschiedenen ATC-Einheiten betreut (<http://www.austrocontrol.at>).

Flughäfen mit allen ihren notwendigen Prozessen bilden bei hohem Verkehrsaufkommen aufgrund der Start-/Landebahnen als *Single Point of Entry* die Flaschenhalse im System Flugverkehr. Hier wird das Flugverkehrsmanagement auf möglichst hohe Kapazitäten hin optimiert, das heißt das Ziel des Systems ist, möglichst viele Starts und Landungen zu ermöglichen. So hat man zum Beispiel in der Flugsicherung Verfahren zur Verringerung von Stafflungsintervallen entwickelt. Bei optimalen Sichtverhältnissen darf hier mit 3 NM (bei manchen speziellen Verfahren teilweise sogar darunter) gestaffelt werden, bei *Adverse Weather* hingegen kann sich die Stafflung durchaus auch wieder auf bis zu 10 NM erhöhen.

Ganz wichtig ist aber auch hier wieder das möglichst reibungslose Zusammenspiel zwischen Piloten und allen beteiligten Einheiten, das im folgenden Kapitel vor allem unter dem speziellen Fokus „Wetter“ beschrieben wird.

#### 4.1 TWR – Tower Control

Visuelle Beobachtungen sind normalerweise die primäre Methode den Verkehr zu kontrollieren. Daher sind Kontrolltürme normalerweise so gebaut, dass die dort arbeitenden Flugverkehrsleiter das gesamte Flughafengebiet und seine Umgebung einsehen können, die Konstruktion der Tower-Kanzel muss den dafür notwendigen Panoramablick ermöglichen. Natürlich stehen den Tower-Lotsen auch technische Hilfsmittel wie Radar oder alternative Navigationssysteme zur Verfügung. Bei schlechten Sichten oder tiefen Wolken ist aber fast immer mit technisch bedingten Einschränkungen zu rechnen. Ausgezeichnete VMC ermöglichen also erst die optimale Performance im Betrieb eines Flughafens und aller dafür notwendigen Systeme.

Die Aufgabenbereiche der Flughafenkontrolle hängen stark von Größe und Konfiguration des Flughafens ab, die prinzipiellen Aufgaben *Ground Control*, „Tower Control“ und *Clearance Delivery* werden im Folgenden kurz beschrieben.

- *Clearance Delivery* koordiniert die Freigaben für die Starts einerseits mit dem EUROCONTROL Network Management (oft auch noch CFMU – „Central Flow Management Unit“ genannt) in Brüssel und andererseits mit den anschließenden APP- und ACC-Einheiten. Unter Normalbedingungen passiert das nahezu

automatisch, bei Schlechtwetter oder zu hohem Verkehrsaufkommen müssen aber Maßnahmen wie zum Beispiel Holdings oder auch Regulierungen (*Slots*) gesetzt werden. Ideal sind möglichst kurze Zeiten zwischen dem Anlassen der Triebwerke und dem Abheben von der Startbahn, dabei muss für das Rollen zur Startbahn eventuell auch die notwendige Zeit für eine Enteisung berücksichtigt werden. Diese Startsequenz wird zusätzlich noch von den herrschenden Sichtbedingungen, einem etwaigen Bodenbelag, aber auch von den notwendigen Sicherheitsabständen wegen Wirbelschleppen der zuvor gestarteten Flugzeuge beeinflusst. Die am Flughafen notwendigen geänderten Abläufe bei *Adverse Weather*, wie Gewitter oder Winterbetrieb, beeinflussen natürlich auch zumindest indirekt die Abflugsequenzen.

- Auf Basis dieser Informationen gibt dann die Bodenkontrolle (GND – *Ground Control*) der Cockpit-Crew die Anweisung die Triebwerke zu starten, kontrolliert das Rollen auf den Rollwegen bis hin zum Start, gegebenenfalls mit einem kurzen Umweg zur Enteisungsposition. Auf großen Flughäfen wird diese Aufgabe für die Park- und Vorfeldflächen, das sind alle Flächen außer den Rollwegen und Startbahnen, an eine eigene *Movement Control* delegiert.
- Die Bewegungen auf den Start- und Landebahnen sowie im Nahbereich des Flughafens fallen in den Verantwortungsbereich des *Tower Controllers*. Er gibt die Freigaben für Start und Landung sowie alle notwendigen Anweisungen für die sicheren Abläufe innerhalb der Kontrollzone (CTR).

Flugzeuge starten und landen im Normalfall nur gegen den Wind. Daher hat hier die genaue Beobachtung, Analyse und Vorhersage des Bodenwinds eine sehr große Bedeutung, konkret werden dabei die Komponenten des Windes entlang und quer zur Pistenrichtung betrachtet. Ein mittlerer Schwellwert für die gerade noch zulässigen Rückenwindkomponenten beim Landen liegt bei trockener Piste bei etwa 6 bis 8 kt, bei nassen oder rutschigen Pistenbedingungen reduziert sich dieser Wert weiter. Generell wird aber bei Tailwind-Komponenten stärker als 8 kt die Pistenrichtung umgedreht, sodass dann wieder gegen den Wind gelandet wird. Starker Gegenwind (*Headwind*) in Pistenrichtung ist per se kein allzu großes Problem, hier spielt die meist damit verbundene Turbulenz eine größere Rolle. Die höchst zulässige Querwindkomponente hängt genauso wieder von Flugzeug, Piloten und etwaigen *Company Limits* ab, wobei hier auch wieder meteorologische Faktoren, wie Turbulenz, Pistenbeschaffenheit (trocken-, nass, ...) und dergleichen in

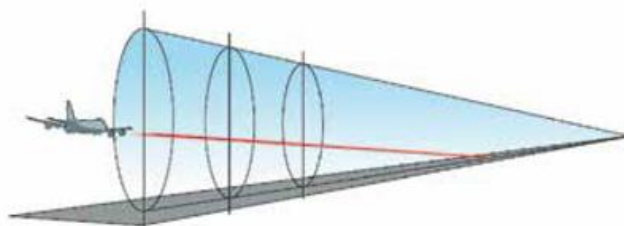


Abb. 4-4: Über Landekurs- und Gleitwegsender wird ein Instrumentenlandesystem gebildet (<http://www.austrocontrol.at>).

die Abschätzung eingehen. Selbst wenn die Flugzeuge bei Sturm gegen den Wind unter Umständen noch landen könnten, gibt es dann beim weiteren Rollen zur Parkposition oft typen- und company abhängige Schwellwerte für die maximal zulässigen Seitenwindkomponenten.

Bei schwachwindigen Situationen bestimmen betriebliche Faktoren wie Verkehrsströme aber auch Überlegungen zur Lärmvermeidung die Start- und Anflugrichtung, dabei muss aber immer die Wirbelschleppensituation im Auge behalten werden.

Bei guten Sichten kann nun ein Flugverkehrsleiter all diese Faktoren visuell beurteilen und kontrollieren. Abweichungen vom Standardanflug sind auf diese Weise rasch erkennbar und die entsprechenden Anweisungen können erteilt werden, dadurch werden geringere Staffellungen (sogar < 3 NM) möglich.

Der Linienflugverkehr muss natürlich auch bei schlechten Sichten und tiefen Wolkenuntergrenzen weiter betrieben werden können. Für Landungen bei Instrumentenflugbedingungen (IMC) müssen spezielle Anflugverfahren geflogen werden, je nach Ausrüstung der Flughäfen unterscheidet man zwischen

- *Precision Approach*: Mithilfe eines Instrumentenlandesystems (ILS, siehe Abbildung 4-4) kann auch bei dichtem Nebel angefliegen werden. Landekursender und Gleitwegsender senden dafür horizontale und vertikale Leitstrahlen, der Anflug bis zur Piste wird hauptsächlich über Instrumente im Cockpit kontrolliert. Das Flugzeug folgt dem Gleitpfad bis zu einer definierten Entscheidungshöhe (*Decision Height*), wo der Pilot auf der Piste eine bestimmte Distanz sehen muss, andernfalls muss der Anflug abgebrochen und ein definiertes *Missed Approach*-Verfahren geflogen werden. Die Infrastruktur der jeweiligen Landebahn bestimmt die ILS-Kategorie (die entsprechenden Entscheidungshöhen und notwendigen Pistensichtweiten sind in Tabelle 4-2 zusammengestellt)

| Category of Operations | Decision Height (DH) (2)                                   | RVR                                    | Visibility not than less |
|------------------------|--|--|--------------------------|
| CAT I                  | not lower than 60 m (200 ft)                               | not less than 550 m                    | 800 m                    |
| CAT I                  | lower than 60 m (200 ft), but not lower than 30 m (100 ft) | not less than 350 m (1)                |                          |
| CAT IIA                | lower than 30 m (100 ft) or no DH                          | not less than 200 m                    |                          |
| CAT IIB                | lower than 15 m (50 ft) or no DH                           | less than 200 m but not less than 50 m |                          |
| CAT IIC                | no DH  | no RVR limitation                      |                          |

Tab. 4-2: Die ILS-Kategorien Entscheidungshöhe und Pistensichtweite (RVR - *Runway Visual Range*) für einen Precision Approach ([http://www.skybrary.aero/index.php/Precision\\_Approach](http://www.skybrary.aero/index.php/Precision_Approach)).

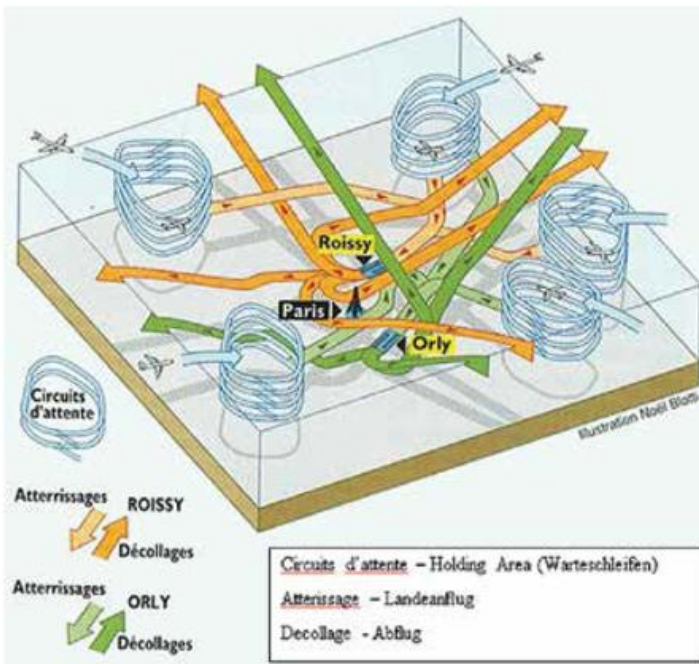


Abb. 4-5: Schematische Darstellung der TMA Paris mit den Standardan- und Abflugrouten bei Westwinden auf die beiden Flughäfen Roissy (orange) und Orly (grün), sowie die Holding Areas (hellblau). Im Falle von Luftraumüberlastungen werden Holdings Areas eröffnet, wo die Flugzeuge in Warteschleifen auf ihre Landfreigabe warten (JOSSE 2009).

- *Non-Precision Approach*: Im Gegensatz zum Instrumentenlandesystem werden hier nur laterale Leitsysteme verwendet, die vertikale Führung erfolgt normalerweise über alternative Systeme. Damit kann man auch in topographisch schwierigem Gelände wie in den Bergen oder auch an Meeresküsten IFR-Anflüge durchführen. Für jeden Flughafen muss aber ein eigenes Anflugverfahren definiert werden. Jedes dieser Verfahren benötigt genauso entsprechende Mindestsichten und Bewölkungsbedingungen, gleichzeitig muss bis zu einer *Minimum Descent Altitude* ein hindernisfreier *Missed Approach* gewährleistet sein ([http://www.skybrary.aero/index.php/Non-Precision\\_Approach](http://www.skybrary.aero/index.php/Non-Precision_Approach)).

Neben den atmosphärischen (meteorologischen) Faktoren muss auch die Pistenbeschaffenheit beachtet werden. Aquaplaning, Schnee- oder Eisglätte haben ebenfalls große Auswirkungen auf die An- und Abflugrate. Der Flughafenbetriebsleiter macht regelmäßige Messungen, damit immer der korrekte Reibungskoeffizient in den Planungen verwendet werden kann. Hingegen kann bei trockener Piste und somit sehr guten Reibungsverhältnissen die Benutzung von Schnellabrollwegen die Verweildauer der Flugzeuge auf den Landebahnen verkürzen und dadurch die Landeintervalle verringern.

Prinzipiell muss immer – also auch in Grenzfällen – der verantwortliche Pilot aufgrund der übermittelten Messwerte entscheiden, ob er noch einen Anflug auf eine Landebahn akzeptiert und in der Folge auch beginnt oder gleich eine andere Landebahn verlangt. Wenn der Pilot während eines Landeanflugs feststellt, dass die Bedingungen doch nicht

passen oder es Abweichungen vom geplanten Anflug gibt, hat er immer noch die Möglichkeit, durchzustarten und den Anflug entweder noch einmal zu versuchen oder zu einem Ausweichflughafen zu fliegen.

#### 4.2 APP – Approach Control – Anflugkontrollstelle

*Approach Control* koordiniert und kontrolliert alle An- und Abflüge aber auch die Durch- und Überflüge innerhalb der *Terminal Manoeuvring Area* (TMA), das ist der Luftraum um die Kontrollzone eines Flughafens. Abbildung 5-5 illustriert am Beispiel des Großraum Paris schematisch diese recht verschränkten An- und Abflugrouten auf die beiden Flughäfen Paris-Roissy (Charles de Gaulle) und Paris-Orly sowie die Einrichtung von *Holding Areas*.

Ein startender Flug wird im Regelfall entlang definierter Standardabflugrouten (*Standard Instrumental Departure* - SID) durch die TMA geführt. Diese Routen werden abhängig von der umgebenden Topographie für jede Pistenrichtung bis hin zu bestimmten Übergabepunkten definiert, wobei hier versucht wird, die Anrainer bestmöglich vor Fluglärm zu schützen. Die meteorologischen Anforderungen in der Abflugleitung liegen hauptsächlich in der Minimierung von Wettergefahren, neben Turbulenz und Vereisung müssen vor allem Gewitter umflogen werden. Das Hauptproblem für eine Flugsicherung liegt bei Wetterproblemen hauptsächlich im erhöhten Arbeitsaufwand, zum Beispiel erfordert das Umfliegen von Gewittern und dabei das Abweichen von Standardrouten deutlich mehr Koordinations- und Kommunikationsaufwand.

Etwas komplexer gestalten sich die Flugsicherungsaufgaben beim Anflug auf einen Flughafen. Ein Flug wird beim sogenannten *Approach Fix*, das ist ein definierter Einflugpunkt in die TMA, von APP übernommen und dann über eine *Standard Arrival Route* (STAR) auf einem möglichst kurzen aber auch umweltschonenden Weg bis zum Gleitpfad auf der Pistenachse geführt, wobei wieder alle Sicherheitsaspekte eingehalten werden müssen. Gemessen wird hier die *ATC-Performance* hauptsächlich in Pünktlichkeitsstatistiken, zunehmend werden aber auch der möglichst optimierte Treibstoffverbrauch und damit einhergehend auch geringerer Schadstoffausstoß thematisiert. Um diese Ziele zu erreichen, werden sogenannte *Continuous Descent Approaches* mit möglichst wenig Schub und *Clean Configuration* der Flugzeuge angestrebt (wenig Flaps-Landeklappen, spätes Ausfahren des Fahrwerks). Ein weiterer positiver Nebeneffekt ist dabei auch der geringere Lärm der landenden Flugzeuge. Damit solche Anflüge geflogen werden können, sind sehr präzise Wind- und Temperaturdaten und sonst keine oder nur geringe Wettereinflüsse Voraussetzung. Auf der anderen Seite muss von ATM auch eine möglichst hohe Kapazität bereitgestellt werden, das heißt, eine möglichst hohe Anflugrate (gemessen in landenden Flugzeuge pro Stunde) wird angestrebt. Einzelne Flüge

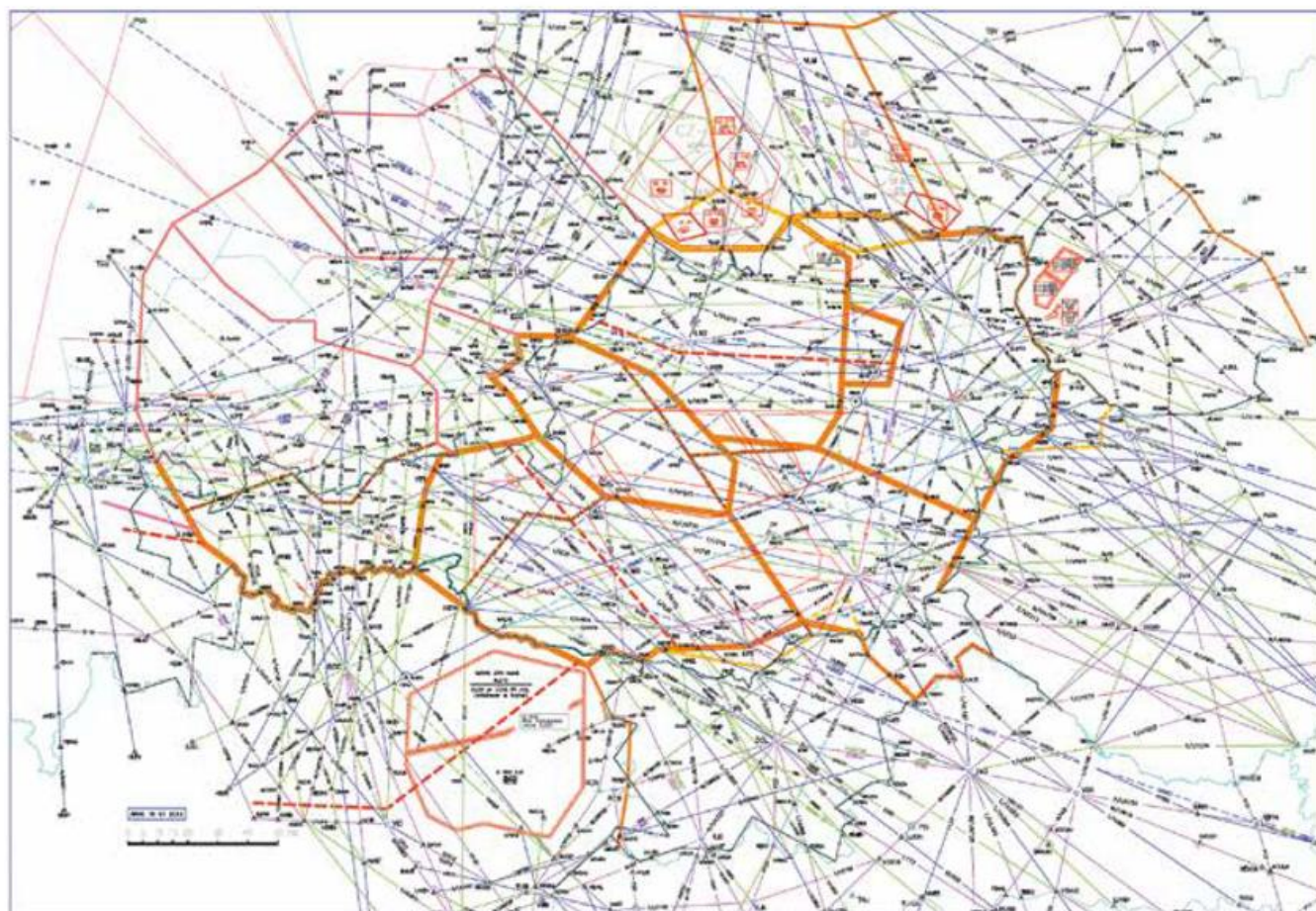


Abb. 4-6: Übersicht über die komplexe Struktur den Flughafen FIR Wien. Die Sektoren sind orange, die Luftstraßen sind blau, grün und rosa eingefärbt, die Details sind in den jeweiligen AIPs (*Air Information Plan*) nachzulesen (<http://www.austrcontrol.at>).

müssen dafür auch beschleunigt werden, was wiederum gegen das Umweltziel läuft. Auf ATM-Seite wird diesen konträren Anforderungen mit einer möglichst sauberen Planung mittels Arrival Managern begegnet, in diesem Planungstool werden alle relevanten Faktoren verknüpft und man erreicht damit eine möglichst genaue und objektive Sequenzierung der anfliegenden Flugzeuge. Mit den derzeitigen Flugsicherungssystemen sind diese Konzepte in verkehrsschwachen Zeiten schon umsetzbar, zukünftig sollen aber auch in verkehrsreicheren Zeiten zunehmend diese wirtschaftlicheren und umweltfreundlicheren Verfahren angewandt werden.

Die Mindest-Staffelung im Anflug wird sehr stark von meteorologischen Bedingungen bestimmt. Mit den heutigen technischen Systemen können bei optimalen Sichtbedingungen Abstände < 3 NM erreicht werden. Wetterphänomene wie Starkwinde, Turbulenz und Windscherungen, Vereisungszonen, Nebel oder Hochnebel (siehe LVP) machen größere Staffelungsintervalle notwendig. Die konvektiven Wettererscheinungen wie Schauer und Gewitter und die damit verbundenen Gefahren wie Hagel, Vereisung, Turbulenz, Downbursts, Böenlinien und dergleichen, bringen weitere Komplexität in die Anfluggestaltung ein.

Eine möglichst hohe *Arrival-Rate* ist eine der Hauptaufgaben der Anflugkontrolle, wobei natürlich immer alle Si-

cherheitsaspekte oberste Priorität haben, ein ATCO muss somit ständig eine Mindestseparation zwischen den Luftfahrzeugen anstreben, gleichzeitig sollen aber auch jegliche Wettergefahren vermieden werden. Wenn nun mehr Flugzeuge landen wollen, als die Kapazität eines Flughafens zulässt, dann werden diese Flugzeuge in vordefinierte Warteschleifen geschickt, bis sie die Freigabe für den Beginn des Landeverfahrens bekommen. Natürlich müssen auch diese *Holding Areas* frei von Wettergefahren sein, was vor allem bei Gewitterlagen im Sommer manchmal zusätzliche Komplexität in die Aufgaben der Flugverkehrsleiter einführt.

Neben der Verkehrsabwicklung für die kommerzielle Luftfahrt müssen in manchen *Terminal Areas* auch noch Sichtflüge koordiniert werden, für eine Freigabe von Sichtflügen müssen aber auf jeden Fall Sichtflugbedingungen gegeben sein.

### 4.3 ACC – Area Control Center – Bezirkskontrollstelle

Wenn ein Flug nun die TMA verlässt, wird er von der ACC zur En-Route-Kontrolle übernommen. Auch hier gilt wieder Sicherheit als oberste Priorität, ansonsten wird der Luftverkehr so effizient wie möglich unter Beachtung von möglichst hohem Passagierkomfort abgewickelt. Ein Lotse ist also bestrebt, jedem Flug die für ihn jeweils wirtschaftlichste und komfortabelste Flugroute

durch den von ihm kontrollierten Luftraum zu ermöglichen.

Eine Bezirkskontrollstelle (ACC) ist verantwortlich für die Flugverkehrsleitung innerhalb ihrer FIR/UIR (*Flight/Upper Information Region*). Der anfallende Flugverkehr wird normalerweise entlang der Flugstraßen abgewickelt, das sind definierte Routen, die auf der einen Seite möglichst großkreisparallel – also so direkt wie möglich – geführt sind und auf der anderen Seite, die in diesem Luftraum vorherrschenden Verkehrsströme bestmöglich berücksichtigen. Wenn nun ein Flug durch diese FIR geplant wird, muss ein Pilot in seinem Flugplan genau angeben, wann er welche Flugroute in welcher Höhe befliegen wird. Die Auswahl dieser Route wird hauptsächlich bestimmt vom vorhergesagten Höhenwind sowie von einem weitgehenden Fehlen von Wettergefahren oder anderen komforteinschränkenden Phänomenen. Alle aufgegebenen Flugpläne werden vom *Network Management* in Brüssel koordiniert und an die betroffenen ACCs verteilt. Die jeweils durchgeflogene ACC versucht dann, jeden einzelnen Flugplan so gut wie möglich abzarbeiten. Dabei gilt es zu hohe Verkehrsdichten zu vermeiden, da ja nach wie vor Mindestabstände zwischen den Flugzeugen eingehalten werden müssen. Um nun diese Vielzahl an Flügen adäquat lenken zu können, wird eine FIR in mehrere Sektoren unterteilt (siehe Abbildung 4-6). Jeweils zwei ATCOs sind für ihren Sektor verantwortlich, wenn ein Flug an eine Sektorgrenze kommt, wird er an die Lotsen des nächsten Sektors übergeben. Jeder Sektor hat auch eine eigene Funkfrequenz, dadurch ist die Kommunikation mit allen Piloten innerhalb dieses Sektors gewährleistet. Die Sektoren sind so gestaltet, dass die Lotsen den anfallenden Verkehr noch sinnvoll leiten können. Zu viel Verkehr kann zu Überlastungen führen, eine natürliche Grenze wird hier durch die notwendige Zeit für das Sprechen aller Anweisungen gesetzt, aber auch eine Unterforderung des Lotsen aufgrund von zu wenig Verkehr, gilt es zu vermeiden. Wenn nun zu viel Verkehr erwartet wird, kann ein Sektor horizontal oder vertikal geteilt werden, wird hingegen wenig Verkehr erwartet, können Sektoren auch zusammengelegt werden. Verantwortlich für diese dynamische Sektorgestaltung zeichnet der sogenannte Supervisor, das ist der Schichtführer der entsprechenden Einheit, in recht komplexen Organisationseinheiten teilen sich oft auch mehrere Supervisoren diese Aufgabe.

Die Arbeitsbelastung von ATCOs erhöht sich deutlich, wenn durch *Severe Weather* Teile des Luftraums nicht mehr oder nur noch eingeschränkt verwendet werden können, hohe Verkehrsdichte kann diese Problematik noch weiter verstärken. Aufgrund der geringen Luftdichte sind in größeren Flughöhen nur noch sehr enge Fluggeschwindigkeitsbereiche möglich (*Coffin Corner* – die Mindestgeschwindigkeit und Höchstgeschwindigkeit liegen sehr nahe

beieinander), daher kommt der Vermeidung von Turbulenz eine sehr große Bedeutung zu, das gilt sowohl für CAT (*Clear Air Turbulence*) als auch für Turbulenzen in Verbindung mit der auftretenden Konvektion, das heißt Ort, Intensität und Ausdehnung von Gewittern bestimmen Art und Umfang des Ausweichverhaltens der Flugzeuge.

Zusammengefasst benötigt das Flugverkehrsmanagement präzise Windvorhersagen für die möglichst wirtschaftliche Planung des Verkehrs durch den hohen Luftraum, außerdem sind möglichst genaue Vorhersagen von Turbulenz und Konvektion notwendig. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch, dass in der ATM-Welt hier von CB und nicht von Gewittern gesprochen wird, das verdeutlicht auch die Dominanz der Turbulenzaspekte zusätzlich zu den klassischen Gewittergefahren wie Hagel, Vereisung oder Blitzschlag.

#### 4.4 Aeronautical Information Management – AIM

Der Luftfahrtinformationsdienst (AIS – *Air Information Service*) versorgt Fluglinien und Piloten mit allen für eine sichere Flugdurchführung notwendigen Informationen. Außerdem werden die Flugpläne für jeden einzelnen Flug entgegengenommen und zur Koordination an die durchführende(n) Flugsicherung(en) – aber auch zur zentralen Weiterverarbeitung bei der EUROCONTROL weitergeleitet. Der Berührungspunkt mit den Wetterdiensten liegt eigentlich nur in der Möglichkeit von gemeinsamen Briefing-Systemen, idealerweise werden hier die Piloten mit Flug- und Wetterinformationen aus einer Hand versorgt.

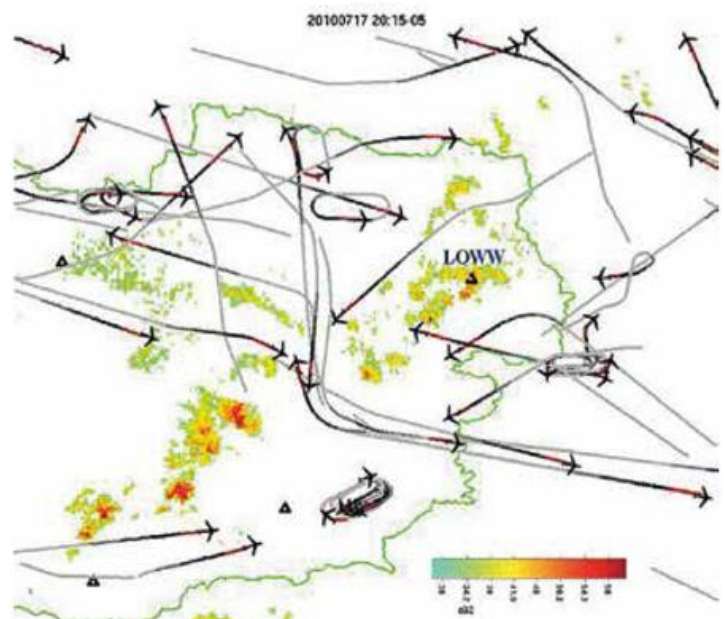


Abb. 4-7: Eine Gewitterlinie überquert den Flughafen Wien Schwechat und verzögert dabei Starts und Landungen. Aus den jeweils 10 Minuten langen Flugzeugtrajektorien (erste Minute rot, dann schwarz und danach grau eingefärbt) erkennt man dann das relativ großräumige Umfliegen der Gewitterzellen sowie die Warteschleifen in den *Holdings* (KALTENBÖCK 2012).

### 4.5 Flight Information Center – FIC

Die Fluginformationszentrale versorgt die Piloten über eigene FIC-Funkfrequenzen mit Informationen über Verkehrslage, Flughäfen, mögliche Gefahren aber auch Wetterinformationen. Diese Aufgabe wird von der Flugsicherung wahrgenommen, für schwierige Pilotenanfragen besteht normalerweise für FIC eine Rückfragemöglichkeit beim verantwortlichen Flugwetterdienst.

### 4.6 Search and Rescue – SAR

Bei Flugunfällen koordiniert der Such- und Rettungsdienst gegebenenfalls notwendige Suchmaßnahmen aus der Luft und dann in der Folge den Rettungseinsatz. Normalerweise passiert das in enger Abstimmung mit dem zuständigen Wetterdienst, die Einsatzleitung beziehungsweise der für den Suchflug verantwortliche Pilot bestimmen aber individuell die Grenzen, bis zu welchen Wetterbedingungen noch geflogen wird.

## 5 Wettereinfluss auf die ATM-Planungsprozesse

Während im vorhergehenden Abschnitt die einzelnen ATM-Einheiten und die jeweils relevanten Wetterproblematiken erläutert wurden, werden in diesem Kapitel die auf das Wetter bezugnehmenden Planungsprozesse und mögliche Mitigationsstrategien beschrieben.

Ziel der Planungen im Luftverkehrsmanagement ist es ja, den anfallenden Verkehr sicher, wirtschaftlich, pünktlich und umweltfreundlich abzuwickeln. Dazu muss neben optimalen Wetterbedingungen, der technischen Infrastruktur auch das notwendige Personal zur Verfügung stehen. Grundlage jeder ATFCM-Planung (*Air Traffic Flow and Capacity Management*) ist der jeweils geplante (sowie der operativ dann auch schon anfallende) Verkehr im En-Route-Bereich, im *Terminal Area* und auf den Flughäfen. Hierfür müssen die entsprechenden Kapazitäten in den jeweiligen Einheiten zur Verfügung gestellt werden.

Eine Flugsicherung plant normalerweise mittel- bis langfristig ihre Geschäftstätigkeit aufgrund von Verkehrspro-

gnosen. Detailliertere Jahresplanungen werden mit der Ausgabe von Sommer- oder Winterflugplänen gemacht, der Personaleinsatz wird anhand der erwarteten Verkehrsbelastung geplant, das Wetter spielt bei diesen Planungszeiträumen noch eine eher untergeordnete Rolle.

Die ersten Wetterüberlegungen werden im Mittelfristzeitraum in der prätaktischen Planung – beginnend etwa 6 Tage vor dem Einsatztag - gemacht. Ausgehend von den Flugplänen der Airlines wird beim EUROCONTROL *Network Management* (NMOC) der allgemeine Traffic Demand abgeschätzt, normalerweise ergeben sich hier Unterschiede zwischen den einzelnen Wochentagen. Anhand von relativ groben Wettervorhersagen werden daraus mögliche zukünftige Problemgebiete identifiziert, aber vorerst noch keine weiteren Maßnahmen gesetzt. Jeweils am Tag davor findet die sogenannte „D-I-Telefonkonferenz“ zwischen dem *Network Management* und den FMPs (*Flow Management Position*) der jeweiligen FIRs statt, wo dann mögliche Probleme – unter anderem auch Wetter – und ihre Auswirkungen auf den Verkehrsfluss auf breiterer Basis besprochen werden. Konkrete Maßnahmen aufgrund des Wetters werden in dieser prätaktischen Planungsphase derzeit aber noch keine gesetzt.

Am Einsatztag geht die Planung dann in die taktische Phase über. Auf Basis der konkret für jeden einzelnen Flug aufgegebenen Flugpläne können von der CFMU schon recht konkrete Aussagen über den jeweils anfallenden *Traffic Demand* in Europa gemacht werden. Auf FIR-Ebene stimmen FMP und Supervisoren diese Verkehrsinformationen mit der aktuellsten Wettervorhersage ab, wenn notwendig kann der verantwortliche Supervisor dann Maßnahmen setzen, die wichtigsten wären:

- *Level-Capping*: Einzelne Flüge erfahren Höhenbeschränkungen, damit wird versucht, Kapazität für die restlichen Flüge in den höheren Bereichen der Sektoren zu schaffen.
- *Re-Routing*: Flüge bekommen neue *Routings*, damit kann Schlechtwettergebieten ausgewichen werden, die betroffenen Sektoren werden entlastet.
- *Regulierungen*: In den von *Severe Weather* betroffenen Sektoren, *Terminal Areas* oder Flughäfen wird die Kapazität reduziert, das heißt weniger Flüge können in den Sektor einfliegen und die Arbeitsbelastung kann wieder bewältigt

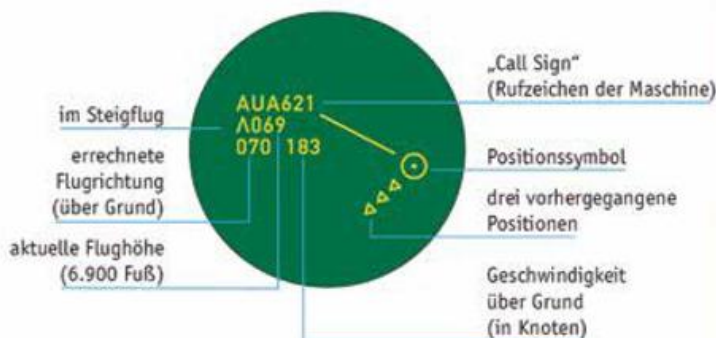


Abb. 4-8: Alle wichtigen Informationen werden mit dem sogenannten *Label* auf dem Radarschirm dargestellt (links). Wetterinformationen werden meist auf einem *Support-Screen* (links vom Radarschirm) dargestellt (Foto rechts <http://austrocontrol.at>).

werden. Noch nicht gestartete Flüge werden über feste Startzeitfenster vorübergehend am Boden gehalten.

Diese Maßnahmen werden dann noch einmal mit der CFMU abgestimmt, die Letztverantwortung trägt aber der jeweilige lokale Supervisor. Diese Maßnahmen sollten wiederum mit den benachbarten FIRs koordiniert werden, damit soll zum Beispiel verhindert werden, dass umgeleiteter Verkehr nicht zu Überlastungssituationen in benachbarten Sektoren führt. Danach werden gegebenenfalls die Flugpläne angepasst und der Verkehr wird operativ abgewickelt.

Bei allen diesen Maßnahmen ist zu berücksichtigen, dass es keine 100-prozentig exakten Wettervorhersagen gibt. Das gilt ganz besonders bei den hier relevanten Wetterphänomenen wie Gewitter, Turbulenz oder Nebel. Besonders der Schritt Regulierung wirkt sehr nachhaltig auf die Verspätungen, wenn einmal reguliert ist, kann selbst bei einer Verbesserung des Wetters kaum oder nur sehr verzögert gegengesteuert werden. Um dieser Problematik zu begegnen, hat man im Flugsicherungsbereich auch alternative Methoden entwickelt, so wird beispielsweise im CARA-Verfahren (*Collaborative Arrival Regulation Avoidance*) der EUROCONTROL nicht mehr reguliert, sondern bei kurzzeitigen Problemen in der Anflugwelle werden einzelne Kurzstreckenflüge „herausgepickt“ und am Boden gehalten. Die *Performance* des Gesamtsystems bleibt dadurch im Großen und Ganzen erhalten. Auch im En-Route-Bereich wird bei der CFMU ähnliches gemacht.

Durch kurzfristiges *Re-Routing* von einzelnen Flügen oder anderen alternativen Lösungen wird gemeinsam mit den betroffenen Fluglinien versucht, die Verspätungen zu minimieren.

Wenn es trotz all dieser Maßnahmen doch einmal zu Problemen gekommen sein sollte, werden diese im Regelfall in *Debriefings* aufgearbeitet, wobei bei wetterbedingten Problemen idealerweise auch die Wetterdienste miteinbezogen werden. Mögliche Ursachen in Kommunikation oder Anwendung können dadurch identifiziert und hoffentlich in der Zukunft vermieden werden, dazu gehören auch Strategien im Umgang mit den leider nicht vermeidbaren Prognosefehlern.

## 6 Wettervorhersagen im Luftverkehrsmanagement

### 6.1 Controller Working Position CWP

Die Steuerung des Flugverkehrs in einem Sektor wird im Regelfall immer von zwei Lotsen wahrgenommen

- Koordinator: Er plant im Voraus die operativen Aktionen und koordiniert diese auch mit den benachbarten Sektoren und sonstigen Einheiten.
- Der *Radar-Controller* setzt diese Aktionen dann operativ um, sein wichtigstes Werkzeug ist der Radarschirm mit dem Verkehrsbild (Abbildung 4-8, links beschreibt einen *Label*) sowie der Funkkontakt mit allen Flugzeugen im Sektor (auf einer Funkfrequenz).

Saturday 15 January 03 UTC till Sunday 16 January 06 UTC

|  | utc: 03           | 04  | 05  | 06  | 07  | 08  | 09  | 12               | 15  | 18  | 21  | 24  | 03  | 06  |
|--|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Visibility < 5 km and/or ceiling < 1000 ft (%) | 60                | 70  | 80  | 90  | 90  | 80  | 40  | 20               | 5   | 5   | 5   | 10  | 30  | 50  |
| RVR < 1500 m and/or ceiling < 300 ft (%)       | 30                | 40  | 50  | 50  | 50  | 40  | 10  | 5                | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 10  |
| RVR < 550 m and/or ceiling < 200 ft (%)        | 15                | 20  | 25  | 30  | 30  | 20  | 5   | 0                | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| RVR < 350 m (%)                                | 5                 | 10  | 15  | 20  | 20  | 10  | 0   | 0                | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Wind direction (deg)                           | 160               | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 170              | 180 | 190 | 230 | 240 | 240 | 240 |
| Wind speed (kt)                                | 5                 | 4   | 5   | 5   | 5   | 6   | 7   | 9                | 9   | 9   | 10  | 12  | 12  | 13  |
| Gusts (kt)                                     |                   |     |     |     |     |     |     |                  |     |     | 15  | 17  | 18  | 19  |
| Standard deviation wind direction (deg)        | 30                | 30  | 30  | 30  | 30  | 25  | 25  | 20               | 20  | 20  | 20  | 15  | 15  | 15  |
| Standard deviation wind speed (kt)             | 2                 | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2   | 2                | 2   | 2   | 2   | 3   | 3   | 3   |
| Temperature (°C)                               | 1                 | 0   | -1  | -1  | -1  | -1  | 0   | 2                | 5   |     |     | 5   | 4   | 4   |
| Dewpoint (°C)                                  | 1                 | 0   | -1  | -1  | -1  | -1  | 0   | 0                |     |     |     |     | 2   | 2   |
| Snow (%)                                       | 0                 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0                | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Moderate or heavy snow (%)                     | 0                 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0                | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| Freezing rain (%)                              | 0                 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0                | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| <b>Remarks</b>                                 | <b>Short term</b> |     |     |     |     |     |     | <b>Long term</b> |     |     |     |     |     |     |
| Visibility and ceiling                         |                   |     |     |     |     |     |     |                  |     |     |     |     |     |     |
| Wind   |                   |     |     |     |     |     |     |                  |     |     |     |     |     |     |
| Temperature/dewpoint                           |                   |     |     |     |     |     |     |                  |     |     |     |     |     |     |
| Precipitation                                  |                   |     |     |     |     |     |     |                  |     |     |     |     |     |     |

Last update: short term 00.10 utc, long term 22.50 utc

Abb. 4-9: Schiphol Probability Forecast - die rot umrandeten Zahlen geben die Wahrscheinlichkeiten für LVP an (KNMI2008).

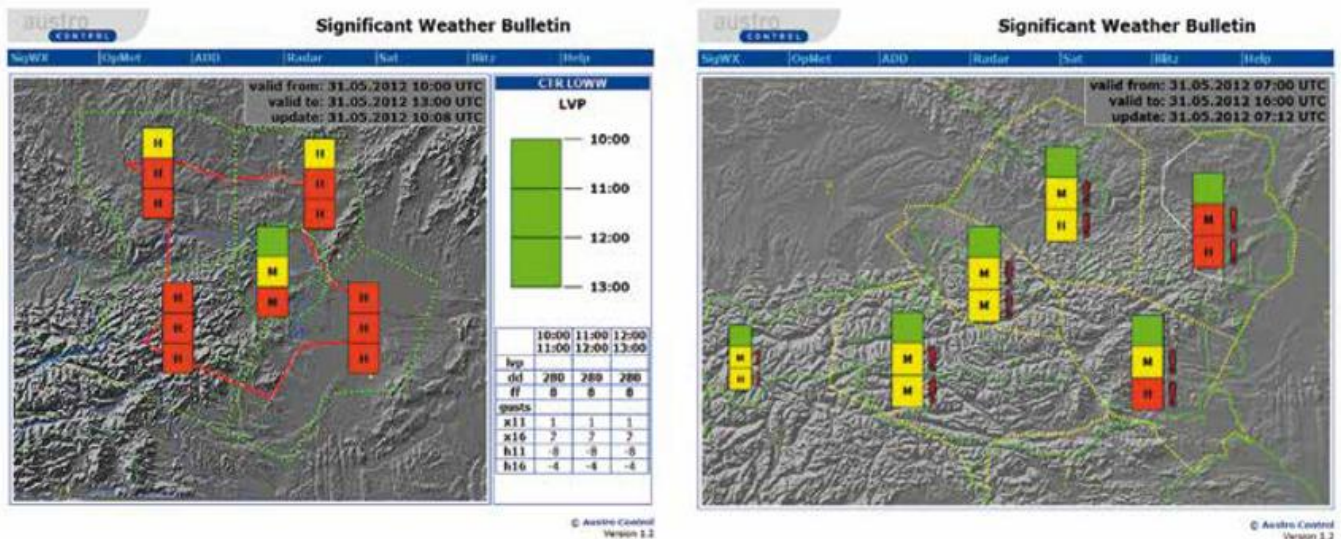


Abb. 4-10: Gewittervorhersagen für die Sektoren des APP Wien (links) und die ACC Wien (rechts). Mit einem Ampelsystem wird Intensität und Ausbreitung der konvektiven Zellen über den jeweiligen Sektor für einen bestimmten Zeitraum beschrieben (<http://www.austrocontrol.at>).

Jede Flugsicherung hat ihre eigenen Methoden, wie Wetterinformation für diesen Arbeitsplatz aufbereitet wird. Die meisten ANSPs haben Wetterinformationen noch nicht am primären Display integriert, damit soll eine Überfrachtung des Bildschirms vermieden werden. Die relevanten Wetterinformationen werden auf einem *Support-Screen* angezeigt (Abbildung 4-8, rechts). Bei manchen Flugsicherungen wie zum Beispiel dem *Maastricht Upper Area Control Centre* (MUAC) werden aber schon Tests gemacht, bei denen Wetterinformationen zumindest schematisch am Raderschirm eingeblendet werden.

### 6.2 CDM - Collaborative Decision Making

Um nun im Luftverkehrsmanagement die bestmöglichen Entscheidungen treffen zu können, müssen alle beteiligten Einheiten alle relevanten und vor allem dieselben Informationen haben. Im Wetterkontext bedeutet das, dass für die jeweilige Problemstellung maßgeschneiderte Produkte entwickelt werden müssen, auf die dann Flughafen, Fluglinien und Flugsicherung gleichermaßen zugreifen und damit ihre Entscheidungen treffen können.

Am besten dokumentiert sind in Europa die Vorhersageprodukte für die großen Hubs:

- **Gemeinsames Schichtbriefing:** Der DWD erstellt für die großen Hubs wie Frankfurt eine spezielle Wettervorhersage.
- **Schiphol Probability Forecast:** KNMI verknüpft diese Vorhersagen auch noch mit Wahrscheinlichkeiten (siehe Abbildung 5-9).
- **CDM@CDG:** Vorhersage von Meteo France für Paris Roissy (Charles de Gaulle).
- **Significant Weather Bulletin:** Bei der Austro Control werden flughafenspezifische Parameter, wie zum Beispiel Vorhersagen für Wind und LVP (*Low Visibility Procedures*), mit den Konvektionsprognosen kombiniert (siehe Abbildung 4-10, links).

### 6.3 Vorhersagen für APP und ACC

Während die Flughafenvorhersagen über eine Punktprognose gelöst werden, benötigen die Vorhersagen für Anflugkontrolle und Überflugkontrolle mehr eine flächige Betrachtung der relevanten meteorologischen Elemente. Damit kann dann der verantwortliche Supervisor den Einsatz der ATCOs – natürlich auch abhängig vom erwarteten Verkehr - auf den jeweiligen Sektoren planen. Wichtig ist hier die möglichst schnelle und intuitive Erfassung der Vorhersagen durch den Flugverkehrsleiter. Bei der Austro Control wird beispielsweise dafür ein Ampelsystem verwendet, das die Ausbreitung der konvektiven Zellen in einem Sektor über einen definierten Zeitraum beschreibt (siehe Abbildung 4-10, rechts)

Für die in den Briefingsystemen gebräuchlichen Darstellungen der konvektiven Vorhersagen sei auf die entsprechenden Webseiten verwiesen, diese werden aber normalerweise nicht von den Flugsicherungen verwendet.

### 6.4 Informationen vom Network Management

Das Network Management der EUROCONTROL betreibt mit dem *Network Operations Portal* (NOP) ein eigenes Web Portal, in dem sie täglich ihre Einschätzung der Auswirkungen von *Severe Weather*-Ereignissen auf das europäische Netzwerk publizieren (<https://www.public.cfm.eurocontrol.int/PUBPORTAL/gateway/spec/index.html>). Unter einem *Severe Weather Event* werden in dem Kontext alle Wetterereignisse verstanden, die eine ATM-Kapazitätseinschränkung von 10 % oder mehr beziehungsweise auch massive Probleme in der Abwicklung des „En Route“-Verkehrs verursachen.

### 6.5 Management von seltenen Ereignissen

Die Luftfahrt musste sich in letzter Zeit auch mit anderen kritischen, oft nur im weiteren Sinn auch mit Wetter

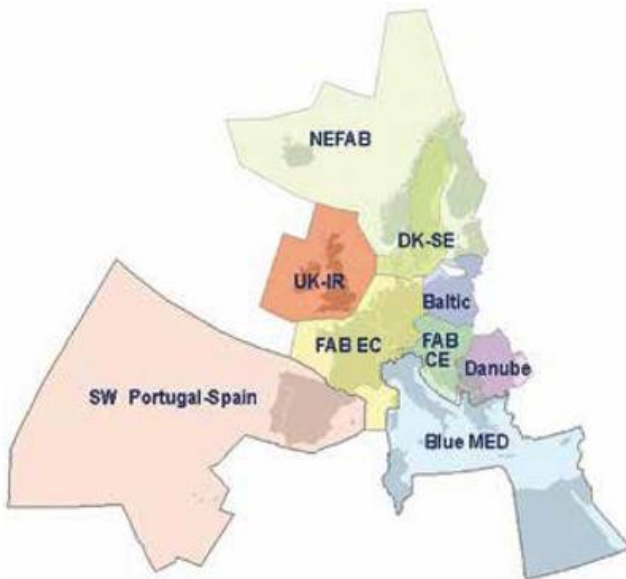


Abb. 4-11: Die neun von der EU-Kommission deklarierten FAB-Initiativen ([http://skybrary.aero/index.php/Functional\\_Airspace\\_Block\\_%28FAB%29](http://skybrary.aero/index.php/Functional_Airspace_Block_%28FAB%29)).

verbundenen Ereignissen auseinander setzen. Dazu zählen Vulkanausbrüche oder auch radioaktive Unfälle, wo die Wetterdienste mit Ausbreitungsrechnungen zur Verminderung der Auswirkungen sinnvoll beitragen. Für weitere Informationen sei auf die entsprechenden Artikel in dieser Zeitschrift verwiesen. Vermutlich wird in nächster Zeit auch das so genannte *Space Weather* und seine Auswirkungen zu diesen nur recht entfernt der Meteorologie zurechenbaren Ereignissen zählen.

## 7 Ausblick

### 7.1 SES – Single European Sky

Im Projekt *Single European Sky* (SES) der Europäischen Kommission wird der doch recht fragmentierte Luftraum in Europa unter dem Gesichtspunkt der Optimierung der Verkehrsströme neu strukturiert, indem eine begrenzte Anzahl von funktionalen Luftraumblöcken (*Functional Airspace Blocks*, FABs) geschaffen wird (siehe Abbildung 4-11).

Die Kommission verfolgt mit dem FAB-Konzept die folgenden strategischen Ziele:

- *Safety*: Trotz Verkehrssteigerungen soll der *Safety-Level* angehoben werden.
- *Capacity*: Der aus den Verkehrssteigerungen erwachsende zunehmende Bedarf soll erfüllt werden können.
- *Cost-Effectiveness*: Durch effektivere Routenstrukturen und optimierte ATC-Services sollen die operativen Kosten in den FABs gesenkt werden.
- *Flight Efficiency*: Durch optimierte Routen und Verfahren soll auch jeder einzelne Flug effizienter abgewickelt werden können.
- *Environment*: Durch diese Maßnahmen soll auch der Umwelteinfluss reduziert werden.
- *Military Mission Effectiveness*: Bessere Koordination der

militärischen Einsätze soll das Gesamtsystem entlasten.

Die den deutschen Sprachraum betreffenden FABs sind FABEC (FAB European Central) mit Deutschland und der Schweiz und der FABCE (Central East) mit Österreich.

Zur Umsetzung dieser strategischen Vorgaben wird zwischen den beteiligten Wetterdiensten eine verstärkte Kooperation und eine vermehrte Koordination ihrer Dienstleistungen notwendig. Großer Wert wird dabei auf die Konsistenz der Vorhersagen gelegt, so müssen zum Beispiel die Höhenwindvorhersagen der verschiedenen Vorhersagemodelle konsistent sein, auch Warnungen müssen über hoheitliche Grenzen hinaus abgestimmt werden (im Regelfall verschwindet ja ein Gewitter nicht an einer FIR-Grenze).

Neben der Optimierung der Verkehrsströme durch die Zusammenlegung mehrerer Flugsicherungen konnten auch praktisch mit dem *Free Route Airspace*-Konzept schon erste spürbare Umsetzungsschritte gesetzt werden. Die EUROCONTROL definiert den *Free Route Airspace* als festgelegten Luftraum, innerhalb dessen Luftraumnutzer frei die kürzeste – im Sinne eines sogenannten *Minimum Time Tracks* unter Berücksichtigung des Windes – Route zwischen vordefinierten Ein- und Ausflugsunkten wählen dürfen, ohne dass eine bestehende Luftstraße benutzt werden muss. Voraussetzung ist dabei, dass der Luftraum auch zur Verfügung steht. Innerhalb dieses Luftraums wird aber trotzdem Flugverkehrskontrolle ausgeübt. Abhängig vom Höhenwind können so die wirtschaftlichsten und damit auch die umweltschonendsten Flugrouten geflogen werden. In der ersten Einführungsphase während der Nacht und in verkehrsschwachen Zeiten (nachts, an Wochenenden) erwartet man sich allein im MUAC (*Maastricht Upper Area Control Centre*) ein Einsparungspotential von 1,16 Millionen km pro Jahr.

Die Prognosen des Verkehrswachstums mussten zwar leicht nach unten korrigiert werden, trotzdem ist aber weiterhin mit einem Anstieg der Flugbewegungen zu rechnen. Aufgrund der zunehmend strengeren Umweltauflagen (zum Beispiel weitere Nachtflugverbote) ist auch zu erwarten, dass sich dieser wachsende Verkehr vor allem in den ohnehin bereits stark beflogenen Bereichen weiter verdichten wird.

### 7.2 SESAR – Single European Sky ATM Research

Mit SES II wurden europaweit für die Schlüsselbereiche *Safety*, *Network Capacity*, *Effectiveness* und *Environmental Impact* klare Performance-Ziele definiert. Bei einer prognostizierten Verdoppelung des Verkehrs bis 2020 soll der *Safety Level* weiter erhöht und gleichzeitig die Umweltbelastung weiter verringert werden. Um diese Performance-Ziele zu erreichen wurde das Programm SESAR aufgesetzt.

Das deklarierte Ziel von SESAR ist eine Steigerung in den Schlüsselbereichen Sicherheit, Netzwerkkapazität, Effektivität und Umwelteinfluss. Technologisch baut SES auf dem SESAR-Programm auf, hier wird die gesamte europäische Entwicklung im ATM-Bereich gebündelt.

Die SESAR-Hauptstoßrichtungen sind im *ATM-Master Plan* zusammengefasst (<https://www.atmmasterplan.eu/views/keyfeatures>):

- Der Übergang von der Bewirtschaftung eines Luftraums hin zu einem Management von Trajektorien stellt einen Paradigmen-Wechsel in der Flugsicherungswelt dar. Jeder einzelne Flug wird dabei als 4D-Trajektorie vom Start- bis zum Ziel-Gate betrachtet. Dieses System funktioniert aber nur bei einer entsprechenden Berücksichtigung aller relevanten Wetterelemente.
- Die Synchronisation des anfallenden Verkehrs: Auch hier bildet das Wetter einen wichtigen Rahmen für die exakte Abstimmung aller Abläufe.
- Die bereits in Abschnitt 6.4 beschriebenen Wettereinflüsse auf Netzwerkmanagement und das dynamische *Demand Capacity Balancing* sollen in SESAR noch vertieft betrachtet werden.
- Einheitliche und konsistente meteorologische Informationen sollen über den *4D Weather Cube* zur Verfügung gestellt werden. Alle Luftraumnutzer können so aus dem *System Wide Information Management (SWIM)* einheitliche und konsistente Informationen beziehen. Neben der Definition der relevanten Inhalte wird im MET-Kontext mit WXXM auch ein neues Austausch-Format definiert, das den zukünftigen Datentransfer erleichtern und die Interoperabilität gewährleisten soll.
- Wie bereits in den Abschnitten 4.1 und 6.2 erläutert, sollte auch bei ungünstigen Wetterbedingungen die Kapazität eines Flughafens möglichst nicht eingeschränkt werden. In SESAR sollen die relevanten Prozesse unter diesem Gesichtspunkt weiter optimiert werden.
- In den jeweiligen SESAR-Arbeitspaketen werden diese Aspekte aus ATM-Sicht betrachtet und die genauen Anforderungen definiert, ein EUMETNET-Konsortium entwickelt dann quer über alle Arbeitspakete hinweg die entsprechenden meteorologischen Lösungen.

### 7.3 European ATM Master Plan

Um nun die Vorgaben von SES koordiniert in Europa umsetzen zu können, hat man mit dem Europäischen *ATM Master Plan* eine gemeinsame *Roadmap* entwickelt, die die notwendigen operationellen und technologischen Entwicklungen zusammenfasst. Dieser Plan beschreibt die notwendigen Umsetzungsschritte für alle Beteiligten. Auch der Master Plan verfolgt die wesentlichen vier *Key Performance Areas Environment, Cost-Efficiency, Safety and Capacity*. Diese Ziele werden dann auf die hauptsächlichsten operationellen Anwendungsbereiche Flughä-

fen, Terminal, *En Route* und Netzwerk-Management heruntergebrochen (<https://www.atmmasterplan.eu/views/openvs>).

Diese operationelle Entwicklung wird in drei große Phasen (*Concept Steps*) unterteilt:

- Step 1 – *Time-based Operations* als Basis für das SESAR-Konzept beschäftigt sich hauptsächlich mit einer effizienten Flugdurchführung, Vorhersagbarkeit des ATM-Systems und einer Reduktion der Umwelteinflüsse. Diese Ziele sollen durch synchronisierte und optimierte Zusammenarbeit erreicht werden.
- Step 2 – *Trajectory-based Operations*. Die Effizienz des gesamten ATM-Systems soll durch das 4D-Trajectory-Konzept und eine optimierte Netzwerkbehandlung weiter gesteigert werden. Damit erhöht sich natürlich auch wieder die Effizienz im Flugbetrieb, Umwelteinflüsse werden reduziert.
- Step 3 – *Performance-based Operations*: Mit einem integrierten und netzzentrierten ATM-System sollen alle SES-Anforderungen an die Performance erreicht werden.

### Danksagung

Ich möchte mich bei meinen Kollegen der Austro Control, MET und ATM für ihre Kommentare und Korrekturen recht herzlich bedanken. Weiterhin danke ich Prof. Hauf und dem Gutachter für ihr Feedback bei der Erstellung dieses Beitrags.

### Literatur

- European ATM Master Plan, The Roadmap for Sustainable Air Traffic Management, Edition 2, October 2012, <https://www.atmmasterplan.eu/>.
- ICAO Annex 2 to the Convention on International Civil Aviation - Rules of the Air 10th Edition, July 2005, Amendment 43, <http://www.icao.int>.
- ICAO Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation - Meteorological Service for International Air Navigation, 17th Edition, July 2010, <http://www.icao.int>.
- JOSSE, P., 2009: MET Capabilities, MET support to ATM workshop, May 27-28, 2009.
- KALTENBÖCK, R., 2012: New generation of dual polarized weather radars in Austria. Extended Abstracts. 7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. Meteo France, Toulouse.
- KNMI 2008: Improved Low Visibility and Ceiling Forecasts at Schiphol Airport. Final report Part 1, KDC/2008/0089 KNMI publication 222.
- PRR 2011- Performance Review Report - An Assessment of Air Traffic Management in Europe during the Calendar Year 2011. Eurocontrol Performance Review Commission, May 2012 <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/single-sky/pru/publications/prr/prr-2011.pdf>.

**Weiterführende Links**

<http://www.dfs.de>

<http://www.austrocontrol.at>

<http://www.skyguide.ch>

<http://www.eurocontrol.int>

<http://www.skybrary.aero/index.php/EUROCONTROL>

<http://www.skybrary.aero/index.php/Portal:Weather>

<http://www.fab-ce.eu>

<http://www.fabec.eu>

<http://www.eurocontrol.int/content/maastricht-uac>

<https://www.public.cfm.eurocontrol.int/PUBPORTAL/gateway/spec/index.html>

<http://www.sesarju.eu>

<https://www.atmmasterplan.eu>

<http://www.homebriefing.com>

<http://www.flugwetter.de>

<http://www.flug-wetter.at>

M. SAUER, T. GERZ

# 5 Wettereinfluss auf Sicherheit und Effizienz im Luftverkehr - Analysen und Minimierungskonzepte

## Weather and Air Traffic Management

### Zusammenfassung

Wetter hat einen signifikanten Einfluss auf die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Luftverkehrs. Die Auswirkung von widrigem oder gar gefährlichem Wetter auf Flüge kann gemildert werden, wenn dieses richtig erkannt, verfolgt und vorhergesagt werden kann, und, gleichermaßen wichtig, wenn diese Information schnell und in eindeutiger Form den Lotsen und Piloten zur Verfügung gestellt wird. Diese Information muss auf die Belange der Nutzer zugeschnitten, einfach und klar in der Aussage und selbsterklärend sein. Gegenwärtig stützt sich die Information auf Expertensysteme bestehend aus meteorologischen Beobachtungen und Vorhersagen. In Zukunft wird als weiteres Element die Flugverkehrsmodellierung mit integrierter Wettersimulation hinzukommen und wetteroptimierte 4D-Flugtrajektorien für die kommerziellen Luftverkehrsmanagementsysteme bereitstellen. Es konnte bereits gezeigt werden, dass mit diesem Ziel entwickelte Verfahren einen deutlichen Beitrag zur erhöhten Sicherheit und Effizienz in der Luftfahrt leisten.

### Abstract

Weather has a significant impact on the safety and efficiency of air traffic. The impact of adverse or even hazardous weather on flights can be mitigated when such weather situations are accurately detected, tracked and predicted and, equally important, when this information is transferred in a timely manner and in simple unambiguous form to controllers and pilots. Such information on adverse weather must be tailored to the user's needs, easy to understand, self-explaining and clear in its message. Currently, the information is based on expert systems comprising meteorological observations and forecasts. In the future, air traffic simulations with integrated weather information will be added and will provide weather-optimized 4D trajectories for commercial air traffic management systems. It has been demonstrated that such procedures make a significant contribution to raising the safety and efficiency of the air transport system.

### 1 Die Herausforderung

Wetter beeinflusst die Luftfahrt in Hinsicht auf Sicherheit, ökonomische Effizienz und ökologische Nachhaltigkeit. Die Initiativen der Europäischen Kommission, Vision 2020 (GOP 2001) und Flightpath 2050 (EUROPEAN COMMISSION 2011) haben für den Luftverkehr der Zukunft in allen drei Bereichen sehr ambitionierte Ziele und Richtwerte vorgeben. Um den Bedürfnissen der Gesellschaft und des Marktes Rechnung zu tragen, wird beispielsweise als Ziel 3 gefordert: „*Flights arrive within 1 minute of the planned arrival time regardless of weather conditions. The transport system is resilient against disruptive events and is capable of automatically and dynamically reconfiguring the journey within the network...*“ (EUROPEAN COMMISSION 2011, Seite 11). Oder in Bezug auf Sicherheit wird als Ziel 2 formuliert: „*Weather and other hazards from the environment are precisely evaluated and risks are properly mitigated*“ (EUROPEAN COMMISSION 2011, Seite 17).

Nun ist aber Wetter kein technisches Problem, das sich kontrollieren ließe: „*We cannot control it [the weather] but we need to learn to live with the elements and steadily eliminate the service disruption that they may cause*“ (GOP 2001, Seite 18). Die Luftfahrtwirtschaft und auch der Passagier müssen sich im Klaren sein, dass der Zustand der Atmosphäre und damit das Wetter nur annähernd bestimmbar und nur innerhalb gewisser Grenzen vorhersagbar sind.

Widriges Wetter ist fast nie die einzige Ursache für Unfälle in der Luftfahrt, aber es liefert sehr oft einen Beitrag zu Unfällen (AVIATION SAFETY 2012). Zwischen 1995 und 2004 war Wetter die Hauptursache in 13 % aller Flugzeugverluste; in 33 % der Unfälle zwischen 2004 und 2007 war die Wettersituation primär oder sekundär beteiligt. Auf der anderen Seite sind Wettereinflüsse als Einzelursache hauptverantwortlich für Verspätungen und Unbill in der Luftfahrt. Schon kleine Ereignisse wie beispielsweise Windsprünge im Anflugbereich können Flughäfen und

Flugkorridore, die nahe an ihren Kapazitätsgrenzen betrieben werden, empfindlich stören und hohe Kosten verursachen. Heute sind in Europa bereits 40 bis 50 % aller Verspätungen durch widriges Wetter verschuldet (EUROCONTROL 2007). Am Flughafen München war 2011 Wetter in 80 % aller Fälle der Hauptgrund für Verspätungen (DFS 2011). Und in den USA waren gar 90 % aller Verspätungen in den Sommermonaten allein durch Gewitter im US-amerikanischen Luftraum verursacht (LEIGHTON 2006).

Einer Studie von EUROCONTROL (2011) zur Folge sind die Wetterphänomene mit der größten Verspätungswirkung im europäischen Luftverkehr Gewitter mit 30,9 %, Schnee und Eis mit 22,1 %, geringe Sicht und niedrige Wolkendecke mit 21,5 % und Wind mit 14,5 %. Alle Phasen des Fluges werden vom Wetter beeinträchtigt, aber die Umgebung der Flughäfen, die sogenannten *Terminal Maneuvering Areas* (TMA) sind besonders durch Windsprünge und Turbulenz, starken Niederschlag, Schnee, gefrierenden Regen und Blitze betroffen. Weltweit ist die Luftfahrt heute einer der Wirtschaftszweige mit den höchsten Wachstumsraten. In Europa stieg die Anzahl der Flüge zwischen 2003 und 2008 etwa um 21 %. Da damit zumindest in Europa in der Regel kein entsprechender Aus- beziehungsweise Neubau von Flughäfen verbunden ist, der zusätzliche Verkehr also mit der bestehenden Infrastruktur abgewickelt werden muss, ist zu erwarten, dass der Luftverkehr bei einer weiteren, wenn auch vermutlich moderateren, Zunahme der Verkehrszahlen künftig noch anfälliger gegen Wetterstörungen sein wird.

Die genannten Zahlen und Trends deuten an, dass es einen immensen Bedarf für verbesserte Wetterinformation für die Luftfahrt gibt, die allen Beteiligten hilft, störendem Wetter besser und frühzeitig zu begegnen und so seine Auswirkungen zu mildern. Die heute genutzten Verfahren wie die Flughafenvorhersage (TAF), die Trendvorhersage für Landungen (TREND) und Luftraumwarnungen für Piloten (AIRMET/SIGMET) erfüllen nicht mehr die Bedürfnisse von Piloten und Lotsen, Fluggesellschaften und Flughäfen, denn weder sind sie spezifisch genug und decken alle Phasen eines Fluges ab, noch enthalten sie alle benötigten meteorologischen Parameter.

Die Gemeinde in der Luftfahrtwirtschaft wächst, die davon überzeugt ist, dass die Störung der Betriebsabläufe durch widriges Wetter durch integrierte, dezidierte und maßgeschneiderte Beobachtungen und Vorhersagen deutlich abgeschwächt werden kann. Statt auf Wetterereignisse, wie beispielsweise Gewitter, zu reagieren, wenn sie bereits eintreten – heute noch vielfältig gängige Praxis – kann das kommende Wetter antizipiert und planerisch vorausschauend in Gegenmaßnahmen berücksichtigt werden: ein wachsender Konsens unter den an der Luftfahrt Beteiligten! Entsprechend zeigen auch Studien, dass mindestens 40 % der durch Wetter verursachten Kosten so eingespart werden könnten. Entscheidend dabei ist die intelligente Einbindung der meteorologischen Information in die Flugverkehrsplanung und Steuerung.

## 2 Wetter und Luftverkehrsmanagement

Das künftige Luftverkehrsmanagement (ATM), so wie es in den europäischen und US-amerikanischen ATM-Modernisierungsprogrammen SESAR und NextGen ins Auge gefasst wird, soll anhand der räumlichen und zeitlichen Planung von Flugtrajektorien den Luftraum so flexibel wie möglich gestalten. Konflikte zwischen geplanten (von den Fluggesellschaften gewünschten) Flugwegen müssen vom System schnell erkannt und automatisch gelöst werden. Besonders in verkehrsreichen Gebieten ist es eine immense Herausforderung, die große Menge sehr unterschiedlicher Daten, wie beispielsweise Flugeigenschaften, Wegprofile, aeronautische und geographische Daten, zu analysieren und zu bewerten. Darüber hinaus müssen auch das operationelle Umfeld (Nachfrage vs. Kapazität) sowie Zustände und Einschränkungen der Flughäfen und der Lufträume in Betracht gezogen werden.

Es leuchtet sofort ein, dass es zum operationell effektiven Betrieb eines solchen vierdimensionalen Flugtrajektorien-Managements unerlässlich ist, auch meteorologische Aspekte mit zu berücksichtigen, das heißt zu antizipieren und in die Planung zu integrieren. Die flugmeteorologische Information (hier kurz „MET“ genannt) entlang der Flugtrajektorie, an Start-, Ziel- und möglichen Ausweichflughäfen muss in adäquater Form und zeitnah in das System eingebracht werden.

Insbesondere die Information über widrige Wetterereignisse muss auf die Situation und das Bedürfnis des Nutzers zugeschnitten, selbst erklärend, konsistent und eindeutig in der Aussage sein. MET muss ein wesentlicher Teil der Informations- und Entscheidungsprozesse im Luftverkehrsmanagement werden. Essentielle Elemente dazu sind

- ein genügend dichtes Netz aus Wetterbeobachtung, Wetteranalyse, Kurzzeit-, Kurzfrist- und Mittelfrist-Vorhersage von störenden Wetterereignissen (deterministisch und probabilistisch, Zeitfenster von jetzt bis etwa 24 Stunden in die Zukunft) integriert zu einem Expertensystem;
- die Bereitstellung dieser Information an alle Beteiligten (konsistent und maßgeschneidert) (*common information sharing*);
- die von allen getragene Übersetzung dieser Wetterinformation in ein „ATM-Regelwerk“, das heißt die Umsetzung im ATM, zum Beispiel die Sperrung von Luftstraßen oder Flughäfen, die Bereitstellung zusätzlichen Personals usw. (*collaborative decision making*) und
- die Berechnung der daraus resultierenden Einschränkungen im Flugbetrieb eines Flughafens und im gesamten Netz (Nachfrage vs. reduzierte Kapazität; *impact analysis*);
- die Simulation wetterbelasteter Verkehrssituationen und die Bereitstellung wetter- und verkehrsoptimierter 4D-Trajektorien durch Luftverkehrsmodelle mit integriertem Wettermodell.

Wetterbedingte Einschränkungen des Luftverkehrs werden von den Beteiligten mittlerweile als so störend empfunden, dass die *World Meteorological Organization* (WMO) 2006 ein Expertenteam zur Luftfahrtmeteorologie ins Leben gerufen hat. Dieses Team hat die Aufgabe, spezifische flugmeteorologische Dienste für die TMA vorzuschlagen und einzuführen, so dass die klassische Flughafenvorhersage um die heute benötigte neue Information erweitert wird. Außerdem ist das WMO-Team mit den einschlägigen Arbeitsgruppen der *International Civil Aviation Organization* (ICAO) in Kontakt, damit diese die zur internationalen Umsetzung notwendigen Regeln und Empfehlungen auf den Weg bringen kann.

Der Verband der Fluggesellschaften IATA hat erst vor Kurzem erneut auf die Dringlichkeit von Reformen im Luftverkehrsmanagement hingewiesen. Der Verband schlägt eine Kooperationsagenda vor, die sich auf vier gemeinsame Ziele konzentrieren soll: *Prioritizing safety, efficiency and environmental benefits; global harmonization and interoperability; proper use of airline avionics investment; and cost effective operations* (IATA 2013). Es ist evident, dass zur Erreichung dieser Ziele die meteorologischen Einflüsse angemessen berücksichtigt werden müssen!

### 3 Wetter und Flugzeug

Wetterphänomene wie Turbulenz, Windscherung, Blitze, starker Regen, Hagel und unterkühlte Wolkentröpfchen beeinflussen die Flugeigenschaften des Flugzeuges. Sie reduzieren den Passagierkomfort oder gefährden sogar die Sicherheit eines Fluges. Solche meteorologischen Bedingungen können in allen Flugniveaus überall in der Atmosphäre auftreten. Sie führen zu einer größeren Arbeitsbelastung der Crew, was sich auch negativ auf die Sicherheit auswirken kann. Gewitter, in deren Kontext die oben beschriebenen Phänomene auftreten können, werden von Piloten als gefährlichste, die Sicherheit am meisten kompromittierende Wettersituation eingestuft. Starke Turbulenz und Windscherung führen zu Beschleunigungen des Flugzeuges, die einen Verlust an Flughöhe oder eine Drehung des Flugzeuges zur Folge haben können. Turbulenz kann auch Rumpf und Flügel des Flugzeuges so in Schwingung versetzen, dass Triebwerke abfallen. Flugzeugvereisung, das heißt kleine unterkühlte aber flüssige Wolken- und Regentropfen, die am kalten Flugzeug gefrieren, können Sensoren und Steuerelemente blockieren, was in falschen Geschwindigkeitsanzeigen und reduzierter Manövrierbarkeit resultiert. Ein Blitzschlag gefährdet zwar nicht die Personen an Bord, er kann aber elektrische Stromkreise zerstören. Hagelkörner können das Cockpitfenster durchschlagen und das Radom beschädigen, starker Regen kann im Triebwerk die Zündung unterbinden. Weitere potentiell gefährliche Phänomene, die mit meteorologischen Prozessen verbunden sind, sind Wirbelschleppen, Vulkanasche und Sandstürme (HAUF et al. 2004).

Für den Piloten basiert heute noch die Information über störende Wetterphänomene auf den sogenannten signifikanten Wetterkarten (SIGMET) und Ähnlichem. Sie werden dem Piloten vor dem Flug bei den Startvorbereitungen überreicht. Diese Daten geben allerdings nicht die maßgeschneiderte und verlässliche Information wieder, die für einen dezidierten Flug benötigt wird, und sind beim Start schon oft veraltet. SIGMET-Karten, beispielsweise, werden auf Basis relativ grob aufgelöster numerischer Wettervorhersagen erstellt, die schon viele Stunden alt sind, wenn sie zum Piloten gelangen. Darüber hinaus gibt es heute weder Sensoren, die Phänomene wie Clear-Air-Turbulenz oder Wirbelschleppen vom Cockpit aus erkennen könnten, noch sind die Steuermechanismen verfügbar und ausgereift genug, um beim Einflug in solche Gebiete entsprechend reagieren zu können.

Was also heute bereits und insbesondere künftig benötigt werden wird, wenn autonom durchgeführte Flüge zahlreicher werden, ist, neben einem modernen ATM, auch ein adäquat ausgerüstetes Flugzeug, das

- gefährliche Situationen (verursacht oder mitbedingt durch meteorologische Prozesse) erkennt,
- die Crew in angemessener Weise darüber informiert und Lösungen (zum Beispiel Ausweichrouten) vorschlägt, und
- das durch Steuermechanismen automatisch in der Lage ist, die Auswirkung der angetroffenen atmosphärischen Störungen auf ein tolerierbares Maß abzuschwächen.

Die Information muss umfassend sein und deshalb sowohl aus Daten bordeigener Instrumente als auch aus Daten kombiniert werden, die am Boden generiert und ins Cockpit übertragen werden.

In den folgenden Abschnitten werden Beispiele genannt, wie maßgeschneiderte Information über Gewitter Piloten helfen kann, kritische Situationen zu meistern. Details der wissenschaftlichen Arbeit findet der Leser in weiteren Beiträgen dieses Heftes und zum Beispiel im Forschungsbericht des DLR-Projektes „Wetter und Fliegen“ (GERZ und SCHWARZ 2012) und bei SCHUMANN (2012).

### 4 Integrierte Beobachtungs- und Vorhersagesysteme

Um aus meteorologischer Sicht den heutigen Bedürfnissen der Luftfahrtwirtschaft Genüge zu leisten, konzipiert und entwickelt das Institut für Physik der Atmosphäre des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) ein integriertes System zu Beobachtung und Vorhersage von störenden Wetterphänomenen, genannt „WxFUSION“. WxFUSION ist ein Expertensystem und kombiniert Daten aus Beobachtung, Kurzzeitfrist-(*Nowcast*)-Werkzeugen und Vorhersagemodellen, um potentiell gefährliche oder störende Wettersituationen zu erkennen, zu verfolgen und für die nahe (bis zu etwa 6 Stunden, *nowcast*) und fernere Zukunft vorauszusagen (TAFFERNER et al. 2008a; FORSTER und TAFFERNER 2009). In Teilaspekten wurde WxFUSION bereits erfolgreich getestet.

Ziel ist es, sowohl die Betriebe am Boden wie auch die Crews in der Luft mit einer hochaktuellen, konsistenten und kundenorientierten Analyse der interessierenden Wetterphänomene und deren Entwicklung zu versorgen. Um einen effizienten und schnellen Prozess der gemeinsamen Entscheidungsfindung auf der Nutzerseite zu unterstützen, wird die Wetterinformation so übermittelt und dargestellt, dass sie keiner Interpretation seitens des Nutzers bedarf, sondern eindeutig und präzise auf die aktuelle und kommende meteorologische Gefahr hinweist. Das bedeutet, dass das meist sehr komplexe Wetterereignis (zum Beispiel Gewitter mit all seinen oben beschriebenen Phänomenen) als einfaches Objekt mittels einer Kontur dargestellt wird, die den gefährlichen Bereich markiert.

Zwei wichtige Komponenten von WxFUSION für die Gewitterwarnung wurden inzwischen entwickelt und in mehreren Kampagnen am Flughafen München getestet und hinsichtlich ihrer Nützlichkeit für den Flugbetrieb am Boden, die Flugsicherung und die Piloten bewertet (validiert): die Werkzeuge Cb-TRAM (*Cumulonimbus Tracking and Monitoring*, ZINNER et al. 2008, MERK und ZINNER 2013) und Rad-TRAM (*Radar Tracking and Monitoring*, KOBER und TAFFERNER 2009). Die Algorithmen erkennen, verfolgen und extrapolieren Gewitterzellen anhand von Satelliten- und Radardaten, die von EUMETSAT und dem DWD bereitgestellt werden.

## 5 Erhöhtes Situationsbewusstsein für das fliegende Personal

In FLYSAFE, einem Projekt des 6. Rahmenprogramms der Europäischen Kommission, wurden Komponenten für das Cockpit entwickelt und getestet, die die Piloten während eines Fluges mit Informationen aus den drei potentiellen Gefahrenbereichen Wetter, Kollision mit anderen Flugzeugen und Kollisionen mit Terrain versorgen und auch eine Priorisierung der Gefahr vornehmen. In diesem Projekt entwickelte das DLR ein Informations- und Management-System für Gewitter, ein Vorläufer von WxFUSION, das Satellitendaten mit Niederschlagsdaten des europäischen Wetterradarverbundes und mit LINET-Blitzdaten kombiniert, um Gewitter als Gefahrenobjekte zu detektieren und kurzfristig vorherzusagen (TAFFERNER et al. 2008b; PRADIER-VABRE et al. 2009; ZINNER und BETZ 2009; ZINNER et al. 2013). Es konnte gezeigt werden, dass diese am Boden verarbeiteten und ins Cockpit transferierten Objektkonturen gut zum dem passten, was das bordeigene Wetterradar im Navigationsdisplay anzeigte, darüber hinaus aber das Bild zu einer Gesamtsituation vervollständigten, da sie ein viel größeres Gebiet erfassen als das Bordradar und Daten aus verschiedenen Quellen miteinander kombinieren. So kann die Sensibilität der Piloten für die Gesamtsituation deutlich erhöht werden, wie Abbildung 5-1 verdeutlicht.

Abbildung 5-1 zeigt eine Momentaufnahme eines Videos der aufgezeichneten Reflektivitäten des Bordradars des

französischen Forschungsflugzeuges SAFIRE ATR-42 (SÉNÉSI et al. 2009). Cb-TRAM-Objekte und Niederschlagszellen mit zwei Intensitätsstufen, die von Bodensystemen stammen, sind als farbige Konturen überlagert. Die Lage und Ausdehnung der Gewitterzellen stimmen gut mit dem überein, was das Bordradar in etwa 50 nautischen Meilen (NM) rechts vor dem Flugzeug sieht. Allerdings weisen die Konturen vom Bodensystem darauf hin, dass es noch weitere Gewitterzellen in der Umgebung gibt, beispielsweise jenseits von etwa 100 NM, die das Bodensystem (noch) nicht erkennt, weil der Radarstrahl durch vorne liegende Zellen abgeschwächt wird oder die Zellen jenseits des Empfangsbereichs des Bordradars liegen. Tatsächlich werden diese Zellen dann 10 beziehungsweise 20 Minuten später tatsächlich auch vom Bordradar erkannt. Beachtenswert ist ferner, dass die Radarsignale links vor dem Flugzeug zwischen 50 und etwa 80 NM nicht durch das Bodensystem bestätigt werden: hier handelt es sich um Echos des Bodens und nicht um konvektive Niederschlagszellen.

Das DLR hat auch Zwischenfälle und Unfälle im regulären Luftverkehr untersucht, bei denen die ins Cockpit übermittelte Information über Gewitter basierend auf Satelliten- oder Bodenradardaten den Piloten höchstwahrscheinlich geholfen haben könnte, die gefährliche Situation rechtzeitig und umfassend zu erkennen (TAFFERNER et al. 2010). Ein Beispiel ist der Absturz des Fluges AF447 von Air France am 1. Juni 2009 über dem Südatlantik. Abbildung 5-2 zeigt ein Infrarot-Bild des METEOSAT-9-Satelliten mit überlagerten Konturen der Cb-TRAM-Objekte um 01:30 UTC, das heißt 40 Minuten bevor die letzte automatisch übermittelte Meldung



Abb. 5-1: Schnappschuss eines Videos der aufgezeichneten Reflektivitäten des Bordradars des französischen Forschungsflugzeuges SAFIRE ATR-42 nahe Grenoble am 19. August 2008 um 14:05 UTC. Dem Bild sind nachträglich die Konturen der vom Bodensystem detektierten Gewitterzellen überlagert. Die farbigen Flächen auf dem Display weisen auf leichte (grün), moderate (orange) und starke (rot) Radarreflektivitäten hin. Die überlagerten orangenen Konturen sind Cb-TRAM-Objekte, gelbe und violette Konturen markieren Zellen mit mittlerem und starkem Niederschlag (nach TAFFERNER et al. 2010).

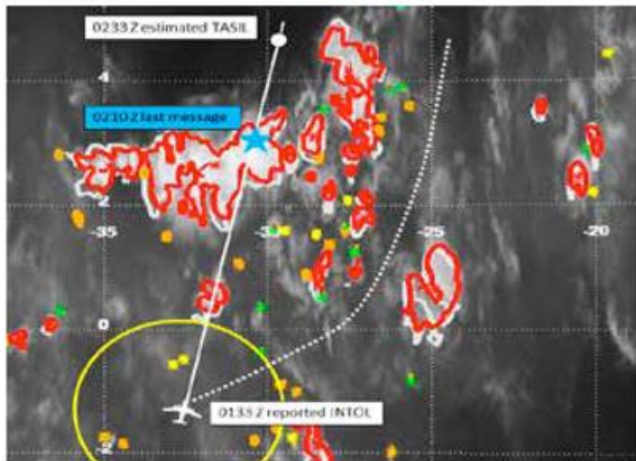


Abb. 5-2: METEOSAT-9-Infrarot-Bild über dem Atlantik östlich von Brasilien am 1. Juni 2009 um 01:30 UTC mit überlagerter Cb-TRAM-Analyse, tatsächlicher Flugroute, Positionen des Fluges AF447 und möglicher Ausweichroute. Die weißen Flächen markieren Gebiete mit sehr niedrigen Temperaturen und weisen auf starke hochreichende Gewitter hin (nach TAFFERNER et al. 2010).

des Flugzeuges von der Verkehrskontrolle empfangen wurde. Die weiße Linie zeigt die Flugroute zwischen den Wegpunkten INTOL (um 01:33 UTC überflogen) und TASIL (Überflug erwartet um 02:33 UTC) an; der blaue Stern markiert die Flugzeugposition um 02:10 UTC, als die letzte Meldung empfangen wurde; der gelbe Kreis soll die ungefähre Reichweite des Bordradars andeuten (etwa 80 NM). Mit der Information des Bordradars alleine konnten die Piloten die vor ihnen liegende starke Konvektion nicht rechtzeitig vorhersehen. Außerdem war es dunkel, so dass auch ein Blick aus dem Fenster nicht weiterhalf. Wie spätere Analysen zeigten, gab es auch nur wenige Blitzentladungen, die die Piloten vielleicht hätten warnen können. Wie Abbildung 5-2 andeutet, hätten aber die Cb-TRAM-Objekte (wenn sie verfügbar gewesen und ins Cockpit übermittelt worden wären) den Piloten einen rechtzeitigen und umfassenden Überblick über die Situation verschaffen und sie bei der Suche nach einer alternativen sicheren Flugroute unterstützen können.

Der Fall des Fluges AF447 und das Beispiel aus dem FLYSAFE-Projekt verdeutlichen, dass Wetterobjekte wie die von Cb-TRAM und Rad-TRAM erzeugten Gewitterkonturen, die auf Beobachtungsdaten von Bodenradaren und Satelliten basieren, allen am Flugverkehr Beteiligten einen guten Überblick über die Situation geben und sie rechtzeitig vor Wettergefahren warnen können. Dazu ist es nicht notwendig, auch die Radar- oder Satellitendaten selbst zu übertragen, was aufgrund der zu geringen Übertragungsraten, beispielsweise ins Cockpit, auch nicht praktikabel wäre. Die Konturen der Wetterobjekte allein reichen aus, da sie die wirklich gefährlichen Zonen markieren (und deren Entwicklung und Verlagerung vorhersagen) und der Pilot oder Lotse die Satelliten- oder Radarbilder daher nicht selbst interpretieren muss.

## 6 Zukünftige integrale Luftverkehrs- und Wettersimulationen

Die geforderte intelligente Integration von Wetterinformation verlangt die Bereitstellung des gegenwärtigen und zukünftigen Wetterverlaufs sowie die damit verbundenen Einschränkungen für den Luftverkehr. Ebenso wichtig ist es, nicht nur den zukünftig geplanten Verkehr sondern auch die Veränderung der Verkehrsbelastung durch das Wetter zu kennen. Diese Aufgabe ist nur durch Modellierung zu lösen und wird derzeit von zahlreichen Forschergruppen auf unterschiedlichste Art und Weise untersucht. Pathfinding Algorithmen, wie der Dijkstra-Algorithmus sind aus der Robotik bekannt und werden häufig für die Trajektorienplanung im Flugverkehr modifiziert angewendet. KROZEL et al. (2004) sowie BELLINGHAM et al. (2002) arbeiten dabei mit stationärem, KAMGARPOUR et al. (2010) hingegen mit dynamischem Wetter, welches im jeweiligen Modell durch sogenannte „No-Go“-Zonen dargestellt wird. Einem deutlich anderen Verfahren bedienen sich DOUGUI et al. (2011), die die Ausbreitung von Licht durch ein Medium unterschiedlicher Brechungsindizes verwenden, um eine konfliktfreie Trajektorie durch ein Feld von Gewitterzellen, welche durch hohe Brechungsindizes dargestellt werden, zu bestimmen.

Einem Verfahren, das dem von KAMGARPOUR et al. (2010) ähnelt, widmet man sich am Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz Universität Hannover. Hier wird ein Modell DIVMET (*divert meteorology*), entwickelt, welches Flugpläne und aktuell mit Radargeräten beobachtete dynamische Gewitterzellen zusammenführt und Ausweichrouten um diese Zellen bestimmt. Dabei werden nicht nur die einzelnen Zellen, sogenannte zweidimensionale Wetterobjekte, berücksichtigt sondern auch Abstände der Sicherheit halber eingehalten, die von internationalen Flugaufsichtsbehörden ausgewiesen sind. Abhängig vom Flugniveau (NATS 2010) oder entsprechend der Stärke eines Gewitters (FAA 1983) sollen 10 bis 20 NM Abstand eingehalten werden. Da zahlreiche Studien gezeigt haben, dass sich das Ausweichverhalten und die dabei eingehaltenen Sicherheitsvorkehrungen individuell sehr unterscheiden und der eingehaltene Abstand weniger einer Stufenfunktion als einer stetigen Verteilung folgt (DELAURA und EVANS 2006), ist der Abstandsparameter in DIVMET variabel. In Abhängigkeit von der Ladung, ob Passagier oder Fracht, und je nach Nähe zum Heimatflugplatz handelt der Pilot verschieden. Frachtmaschinen und Piloten im bekannten Terrain nehmen Beobachtungen zur Folge ein größeres Risiko in Kauf als beispielsweise Piloten kleiner Businessjets (RHODA und PAWLAK 1999; THALES AVIONICS 2010).

Ziel dieser Modellentwicklung ist, Piloten und Lotsen eine Hilfestellung in Gefahrensituationen zu geben, indem sichere und effiziente Routen für die Vermeidung der Gefahrenggebiete vorgeschlagen werden. Basierend auf der anfänglichen Motivation, die Reaktion des Luftverkehrs auf Gewitterzellen zu simulieren und

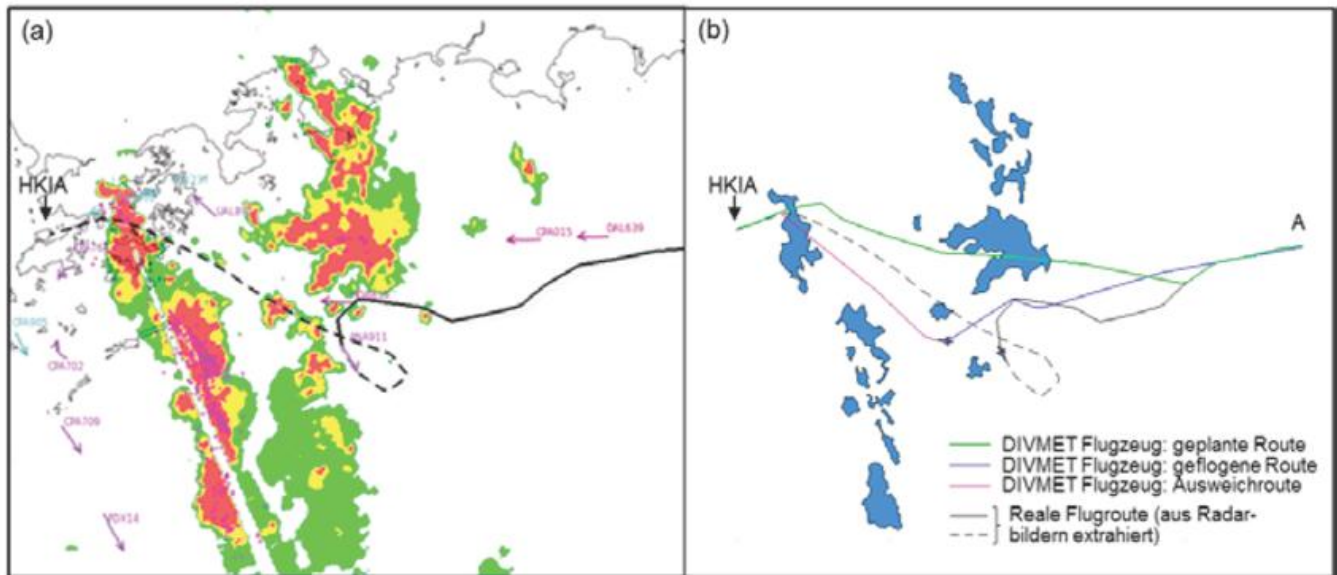


Abb. 5-3: (a) Stationäre Situation überlagerter Wetter- und Flugradarbilder des 8. September 2010 um 22:30 UTC. Das Feld konvektiver Zellen, das sich südwestlich durch die TMA des HKIA bewegt hat, ist anhand der je nach Echointensität (grün:  $< 31$ , gelb:  $\geq 33$  bis  $< 41$ , rot:  $\geq 41$  dBZ) farblich abgegrenzten Polygone und den magentafarbenen Blitzpositionen erkennbar. Ebenfalls in Magenta gekennzeichnet sind die Flugzeugpositionen zu eben diesem Zeitpunkt. Die Trajektorie von Flug ANA911 wurde nachträglich schwarz markiert. (b) Dieselbe Situation in DIVMET simuliert. Die Wetterobjekte entsprechen den roten Polygonen aus (a). Zusätzlich zu Flug ANA911 (schwarze Linie) wurde ein Flugzeug mit demselben Startpunkt A und Zielflughafen HKIA aber einer Standardanflugroute als geplante Route (grün) in die Simulation eingebracht. Für diesen Flug wurde eine Anpassung an die Wettersituation durch DIVMET vorgenommen (blaue/pinke Linie). Visuelle Abweichungen zwischen beiden Flügen sind insbesondere durch das real geflogene  *Holding*  bedingt, welches zumeist im allgemeinen Verkehrsaufkommen und weniger in der Wettersituation begründet ist.

damit das Verständnis der Interaktion beider Systeme, Luftverkehr und Wetter, zu stärken, wurde der Schwerpunkt zunächst aber anders gesetzt: Die Entscheidungsfindung des Ausweichens wurde der heute im Cockpit zur Verfügung stehenden Wetterinformation angepasst, um so das Ausweichverhalten des Piloten zu simulieren. Entsprechend des Sichtfelds des Bordradars werden in einem DIVMET-Modus jeweils nur konvektive Zellen innerhalb eines Kreissegmentes mit variablem Öffnungswinkel und definierter Reichweite berücksichtigt. Gemäß der visuellen räumlichen Ausdehnung der Wetterobjekte links und rechts der geplanten Route wird dann eine laterale Ausweichtrajektorie entlang der konvexen Hüllen um die Wetterobjekte berechnet. Der Vergleich der Modellierungsergebnisse mit Daten des realen Ausweichverhaltens zeigte eine passende Entscheidungsfindung und bildet das Ausweichverhalten von Piloten zufriedenstellend ab (siehe Abb. 5-3). Ausgabeparameter sind in erster Linie zusätzliche Zeit und geflogener Umweg. Daraus lassen sich weitere Metriken, wie der zusätzliche Treibstoffverbrauch, ableiten. In einem zweiten Modus ist die gesamte Wettersituation (über das im Bordradar Bekannte hinaus) bekannt und wird zu jedem Zeitpunkt berücksichtigt. Auf diese Weise ist es möglich den Vorteil, uneingeschränkter Wetterinformation im Cockpit und für alle am ATM beteiligten Agenten zu beziffern und einen Anreiz für den erhöhten Datenaustausch zu schaffen. In einem weiteren Modus erfolgt eine Kopplung DIVMETs an NAVSIM, ein globales Luftverkehrsmodell, welches von ROKITANSKY (2005) und ROKITANSKY et al. (2007) in Salzburg entwickelt wird. In diesem gekoppelten Modus soll es

möglich werden, Flugleistungsdaten zu berücksichtigen und eine Vielzahl von Flugzeugen gleichzeitig umzuleiten.

Eine Vielzahl von Anwendungen wird durch die Entwicklung von DIVMET, alleinstehend oder im gekoppelten Modus, möglich. Studien zur Sektorbelastungs- und -kapazitätsänderung im Fall von Gewittern wurden, wie in Abbildung 5-4 dargestellt, exemplarisch durchgeführt und sollen fortan zur Bestimmung der Veränderung der Verkehrsbelastung des zukünftigen Verkehrsaufkommens bei gefährdendem Wetter herangezogen werden. Generelle Analysen des Zusammenhangs von Sicherheit und Effizienz wurden in simulierten Schauerfeldern mit aus Beobachtungen abgeleiteten und zufällig verteilten Zellen durchgeführt. Wie Abbildung 5-5 zeigt, ergibt sich ein exponentieller Zusammenhang, wobei das Größen- und Abstandsspektrum der kreisförmigen Schauer die Koeffizienten und damit den Verlauf der Funktion bestimmt. Der Umweg wird aber generell umso größer, das Ausweichen damit umso ineffizienter, je sicherer das Ausweichmanöver sein soll.

## 7 Bewertung und Ausblick

Die geschickte Kombination und Verarbeitung von Satelliten- und Radardaten mit Cb- und Rad-TRAM allein reichen nicht immer aus, um jede Gewittersituation richtig zu beschreiben. Es gibt zum Beispiel Fälle von jungen sich schnell entwickelnden aber noch niedrigen konvektiven Zellen, die noch keinen oder nur geringen

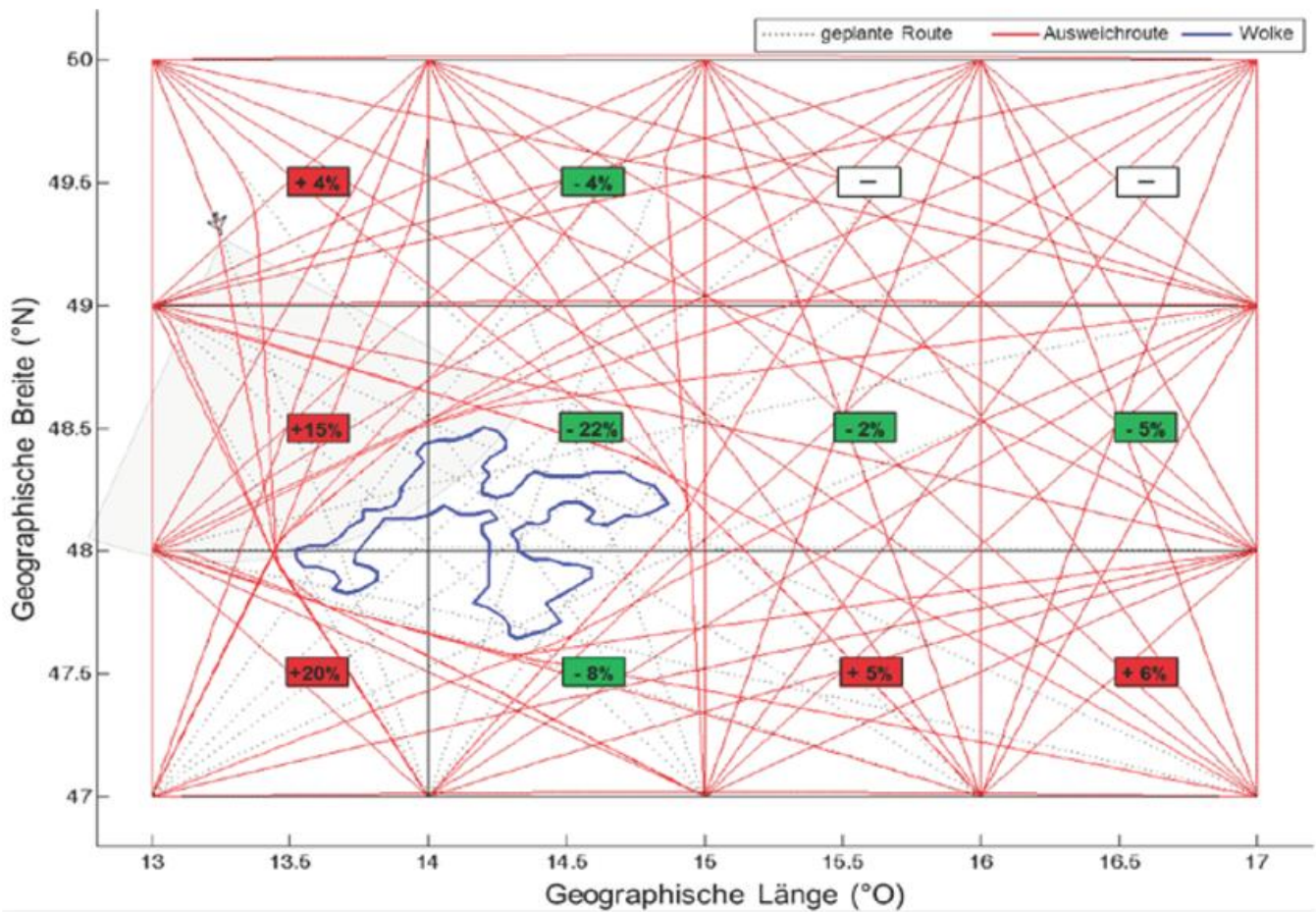


Abb. 5-4: Ergebnis einer Machbarkeitsstudie zur Bestimmung der Sektorbelastungsänderung aufgrund von Wetter. Das generische Setup umfasst 12 Sektoren von jeweils 1° x 1° Größe und insgesamt 63 geradlinige geplante Routen (schwarz gepunktet), die alle äußeren Punkte miteinander verbinden. Der Hauptverkehrsfluss erfolgt von West und Nord, wobei ein eingeschränktes Sichtfeld (grau schattiertes, Kreissegmentes) angenommen wird. Die durch DIVMET bestimmten Ausweichrouten um das Wetterobjekt (blau) sind rot dargestellt. Die Prozentangabe in jedem Sektor gibt die Änderung sogenannter Routenpunkte im Vergleich zum ungestörten Fall an. Routenpunkte werden auf jeder Route im gleichen zeitlichen Abstand gesetzt und die Zahl der Routenpunkte pro Sektor wird als Maß für die Sektorbelastung herangezogen. Entlang der vergrößerten konvexen Hülle des Wetterobjektes und in Sektoren, die teilweise durch Gewitter blockiert sind, kommt es zu einer Drängung des Verkehrsaufkommens (nach SAUER et al. 2013).

Niederschlag produzieren und deshalb von Rad-TRAM und Cb-TRAM nicht erfasst werden. Trotzdem erzeugt die starke Konvektion in den jungen Zellen auch oberhalb der Wolke erhebliche Turbulenz, die den Luftverkehr gefährdet (siehe GERZ et al. 2012). Hier müssen weitere Datenquellen (zum Beispiel Windprofilmessungen) und numerische Vorhersagedaten in die Analyse integriert werden.

Ziel seitens des DLR ist es daher, das Expertensystem WxFUSION stetig um weitere Daten aus Messung und Vorhersage zu erweitern und zu kombinieren. Die Berücksichtigung von Ensemblevorhersagen und die Auswahl der besten Vorhersagen anhand aktueller Messungen ermöglichen dann auch die Ausdehnung des Vorhersagehorizontes von Gewittern von zurzeit 1 Stunde (Nowcasting) bis etwa 6 Stunden.

Die positiven Rückmeldungen der Deutschen Flugsicherung, der Flughafen München Gesellschaft und des Lufthansa Hub Control Centers als Nutzer der Produkte während mehrerer Sommerkampagnen am Flughafen

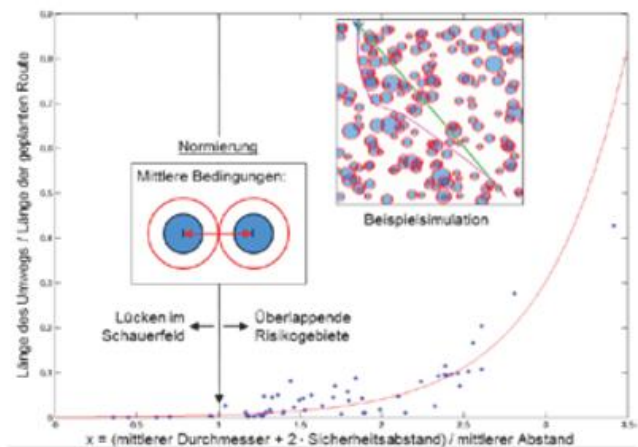


Abb. 5-5: Der Zusammenhang von Effizienz (Länge des Umweges) und Sicherheitsabstand  $x$  zum Objekt kann durch eine Exponentialfunktion angenähert werden. Der intuitive Zusammenhang zwischen Effizienz und Sicherheit wurde durch zahlreiche Modellläufe in unterschiedlich entwickelten Feldern zufällig verteilter und sich statistisch entwickelnder simulierter postfrontaler Schauerzellen bestätigt (nach SAUER et al. 2013).

München und auch ein kürzlich durchgeführter Linienflug der Lufthansa von Brasilien nach Deutschland mit erfolgreich in Echtzeit ins Cockpit übertragenen Cb-TRAM-Objekten von Gewittern über dem atlantischen Äquator verdeutlichen, dass Systeme wie WxFUSION nützliche und wertvolle Informationen zur Sicherheit und Effizienz des Luftverkehrs in Deutschland, Europa und weltweit liefern.

Nicht allein die Bereitstellung von Wetterinformation genügt, um das ATM zu unterstützen. Es ist zusätzlich notwendig, Entscheidungshilfen bereitzustellen und Konsequenzen potentieller Entscheidungen aufzuzeigen. Ein Tool, welches dieser Anforderung Folge leistet, ist DIVMET, welches Piloten und Lotsen einen integrierten Eindruck des Wetters und einer sicheren und effizienten Route geben soll. Vor allem im kombinierten Modus mit NAVSIM wird ein Nutzen für das gesamte ATM angestrebt. Derzeit steht die Integration von Rad-TRAM-Daten im Mittelpunkt der Entwicklung von DIVMET, um die verfügbaren Vorhersagen konvektiver Zellen gewinnbringend zu nutzen und bereits frühzeitig effiziente Routen für den Flugverkehr bestimmen zu können.

Aktuell wird sich ausschließlich auf Gewitterzellen konzentriert. Analog dazu ist es aber denkbar, Vereisungsgebiete oder gar Vulkanaschewolken als Wetterpolygone in WxFUSION und DIVMET zu integrieren.

Ziel ist es, WxFUSION und DIVMET so weiter zu entwickeln, dass sie internationalen Standards genügen und als flugmeteorologische Werkzeuge dem Luftverkehr in einem *Single European Sky* wertvolle Dienste erweisen.

## Literatur

- AVIATION SAFETY, 2012: Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, Worldwide Operations 1959 – 2011. 27 pp, verfügbar unter <http://www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf>.
- BELLINGHAM, J., RICHARDS, A., HOW, J.P., 2001: Receding horizon control of autonomous aerial vehicles. In: Proceedings of the American Control Conference, Anchorage, AK, 8-10 Mai 2001, 3741-3746.
- DELAURA, R., EVANS, J., 2006: An exploratory study of modeling enroute pilot convective storm flight deviation behavior. *12<sup>th</sup> Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology (ARAM)*, Atlanta, GA, 29 Januar – 2 Februar 2006.
- DFS, 2011: Air Traffic Flow and Capacity Management. *4<sup>th</sup> Workshop on MET Support to ATM*, Brüssel, 1-3 Februar 2011.
- DOUGUI, N. E., DELAHAYE, D., PUECHMOREL, S., MONGEAU, M., 2011: Light Propagation Algorithm for Aircraft Trajectory Planning. *American Control Conference*, San Francisco, CA, 29 Juni - 1 Juli 2011.
- EUROCONTROL Performance Review Commission, 2007: Performance Review Report 2006. 160 pp, verfügbar unter <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/single-sky/pru/publications/prr/prr-2006.pdf>
- EUROCONTROL Performance Review Commission, 2011: Performance Review Report 2011. 128 pp, verfügbar unter <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/single-sky/pru/publications/prr/prr-2011.pdf>
- EUROPEAN COMMISSION, 2011: Flightpath 2050 - Europe's vision for aviation. Report of the high level group on aviation research. *Directorates-General for Research and Innovation and for Mobility and Transport*, 28 pp.
- FAA, 1983: Advisory Circular – Thunderstorms. AC **00-24B**.
- FORSTER, C., TAFFERNER, A., 2009: An integrated user-oriented weather forecast system for air traffic using realtime observations and model data. In: Proceedings of the *European Air and Space Conference (CEAS)*, Manchester, UK, 26-29 Oktober 2009.
- GERZ, T., SCHWARZ, C., eds., 2012: The DLR Project Wetter & Fliegen. Final Research Report DLR-FB **2012-02**, 280 pp.
- GERZ, T., FORSTER, C., TAFFERNER, A., 2012: Mitigating the impact of adverse weather on aviation. In: Schumann, U. (ed.), *Atmospheric Physics, Research Topics in Aerospace*. Springer, 645-659, DOI: 10.1007/978-3-642-30183-4\_39.
- GOP, 2001: European Aeronautics: A Vision for 2020 - Meeting society's needs and winning global leadership. Report of the Group of Personalities, *European Commission January*, 26 pp.
- HAUF, T., LEYKAUF, H., SCHUMANN, U. (eds.), 2004: Luftverkehr und Wetter, Statuspapier. *DLR-Mitteilungen 2*, 57 Seiten.
- IATA 2013: Driving ATM improvements, delivering the Single European Sky. Press Release 5, 12. Feb. 2013, verfügbar unter <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2013-02-12-01.aspx>
- KAMGARPOUR, M., DADOK, V., TOMLIN, C., 2010: Trajectory generation for aircraft subject to dynamic weather uncertainty. *49th IEEE Conference on Decision and Control*, Atlanta, GA, 15-17 Dezember 2010.
- KOBER, K., TAFFERNER A., 2009: Tracking and nowcasting of convective cells using remote sensing data from radar and satellite. *Meteorol. Zeitschrift* **18**, 75-84.
- KROZEL, J., PENNY, S., 2004: Comparison of algorithms for synthesizing weather avoidance routes in transition airspace. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Providence, RI, 16-19 August 2004.
- LEIGHTON, Q., 2006: Modeling and Simulation Needs for Next Generation Air Transportation System Research. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, Keystone, CO, 21-24 August 2006, AIAA 2006-6109, 1-8.
- MERK, D., ZINNER, T., 2013: Detection of Convective Initiation using Meteosat SEVIRI: Implementation in and verification with the tracking and nowcasting al-

- gorithm Cb-TRAM. *Atmospheric Measurement Techniques* **6**, 1903-1918.
- NATS, 2010: The effect of thunderstorms and associated turbulence on aircraft. Technical Note AIC: P 056/2010. UK Aeronautical Information Service: Hounslow, Middlesex.
- PRADIER-VABRE, S., FORSTER, C., HEESBEEN, W., W., M., PAGÉ, C., SÉNÉSI, S., TAFFERNER, A., BERNARD-BOUSSIÈRES, I., CAUMONT, O., DROUIN, A., DUCROCQ, V., GUILLOU, V., JOSSE, P., 2009: Description of convective-scale numerical weather simulation use in a flight simulator within the Flysafe project. *Meteorology and Atmospheric Physics*, DOI:10.1007/s00703-008-0317-4.
- RHODA, D., PAWLAK, M., 1999: An assessment of thunderstorm penetrations and deviation by commercial aircraft in the terminal area. Project Report NASA/A-2. MIT Lincoln Laboratory: Lexington, MA, 77 pp.
- ROKITANSKY, C., 2005: VDL Mode 2 Capacity Analysis through Simulations: WP3.B – NAVSIM Overview and Validation Results. Eurocontrol.
- ROKITANSKY, C.H., EHAMMER, M., GRÄUPL, T., 2007: NEWSKY – Novel simulation concepts for future air traffic. In: *Proceedings of 1st CEAS European Air and Space Conference*, Berlin, 10-13 September 2007, 611-618.
- SAUER, M., SAKIEW, L., HAUF, T., HUPE, P., 2013: Some applications of the adverse weather diversion model DIVMET. *16<sup>th</sup> conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, 93th AMS Annual Meeting, Austin, TX, 6-10 Januar 2013, 9 pp.
- SCHUMANN, U. (Hrsg.), 2012: *Atmospheric Physics, Research Topics in Aerospace*. Springer, DOI: 10.1007/978-3-642-30183-4\_39.
- SÉNÉSI, S., GUILLOU, Y., TAFFERNER, A., FORSTER, C., 2009: Cb nowcasting in FLYSAFE: Improving flight safety regarding thunderstorm hazards. *WMO Symposium on Nowcasting*, Whistler, B.C., Canada, 30 August - 4 September 2009.
- TAFFERNER, A., FORSTER, C., HAGEN, M., KEIL, C., ZINNER, T., VOLKERT, H., 2008a: 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., SÉNÉSI, S., GUILLOU, Y., TABARY, P., LAROCHE, P., DELANNOY, A., LUNNON, B., TURB, D., HAUF, T., DANIJELA, M., 2008b: Nowcasting Thunderstorm Hazards for Flight Operations: The CB WIMS Approach in FLYSAFE. *26<sup>th</sup> Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, Anchorage, AK (USA), 14 September 2008, 10 pp.
- 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, *14<sup>th</sup> conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, 90th AMS Annual Meeting, Atlanta, GA, 17-21 Januar 2010.
- THALES AVIONICS, 2010: FLYSAFE – WP 6.7.3 D6.7-3 - Final Publishable Report. 104 pp.
- 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. *Meteor. Atmos. Phys.* **101**, 191-210, DOI 10.1007/s00703-008-0290-y.
- ZINNER, T., BETZ, H.-D., 2009: Validation of Meteosat storm detection and nowcasting based on lightning network data. In: *Proceedings of the EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2009*, Bath, UK, EUMETSAT P.55, ISBN 978-92-9110-086-6, ISSN 1011-3932, 8 pp.
- 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. *Atmospheric Measurement Techniques* **6**, 1567-1583, DOI:10.5194/amt-6-1567-2013.

M. RIEDIGER

# 6 Meteorologische Information für die Flugdurchführung

## Meteorological Information for Flight Operations

### Zusammenfassung

Der Sichtflieger will fliegen, der Instrumentenflieger kann fliegen (vorausgesetzt sein Flugzeug verfügt über eine vernünftige Enteisansanlage), der Verkehrspilot muss fliegen. Alle, die sich in der Luft bewegen, ob sie nun fliegen, segeln, fahren, gleiten oder springen, benötigen ausreichende flugmeteorologische Informationen für eine sichere Flugdurchführung; so sieht es die Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) § 3a (2) vor. Doch nicht nur für Piloten sind flugmeteorologische Informationen unabdingbar. Möglichst genaue Flugwettervorhersagen sind auch für die Flugsicherungen, Flughäfen und andere Bereiche der Luftverkehrsindustrie für einen reibungslosen Ablauf unabdingbar. Der Bericht gibt einen Einblick, auf welche flugmeteorologischen Informationen und Beratungen des Deutschen Wetterdienstes ein Pilot heute zugreifen kann.

### Abstract

VFR pilots want to fly, IFR pilots can fly (provided their aircraft is equipped with an adequate de-icing system), and commercial airline pilots must fly. All those who are airborne, whether they fly, sail, glide or sky dive, need sufficient meteorological information in order to carry out their flight operations safely; as the German Air Traffic Order (LuftVO) §3a (2) prescribes. Yet this meteorological information is not only indispensable for pilots. Accurate meteorological predictions are vital for a smooth process of air navigation service providers, airports and other areas of the aviation industry. The report gives an insight on the meteorological information and services of the German Weather Service that pilots can access today.

### 1 Wetterberatung per Internet

Wetterberatungen werden heute hauptsächlich über das Internet eingeholt. Das Briefingsystem [www.flugwetter.de](http://www.flugwetter.de) (beziehungsweise *pc\_met*) des DWD, das in der Folge beschrieben wird, wird gegebenenfalls ergänzt durch ein telefonisches Beratungsgespräch mit einem Flugwetterberater. Bei den Anrufern handelt es sich entweder um noch unerfahrene Piloten, oder die Wetterlage ist so schwierig, dass selbst erfahrene Piloten professioneller Hilfe bedürfen. Gegebenenfalls verläuft die Flugroute auch über schwieriges Terrain, zum Beispiel über die Alpen. Anrufe aus dem Ausland nehmen an den sechs Luftfahrtberatungszentralen (LBZ) des DWD zu. Ob der Pilot in Griechenland von Insel zu Insel hüpfet, oder die Überführung eines Kleinflugzeuges in Afrika geplant ist. Selbst bei der Überquerung des Himalajas mit einem Heißluftballon lassen sich Piloten gerne von den Luftfahrtberatungszentralen beraten.

Die hohe Akzeptanz der Internetberatung liegt zum einen an der schnellen Zugriffsmöglichkeit auf eine Vielzahl von Daten und Produkten (zum Beispiel aktuelle Wettermeldungen für die Luftfahrt und Wettervorhersagen in codierter Form, sowie Textvorhersagen, Radar- und Satellitenbilder, Blitzkarten, aber auch Wetterwarnungen), zum andern an der professionellen Darstellung der einzelnen Parameter.

Mit dieser Beratungsform hat ein Pilot außerdem der gesetzlichen Verpflichtung sich Wetterinformationen einzuholen (§ 3a LuftVO) genüge getan. Die Rechner des DWD speichern die Anfrage des Piloten als Nachweis. Mehr als 12 000 Kunden nutzen bereits dieses Angebot, Tendenz steigend.

### 2 Übersichtsprodukte

Die Bedürfnisse von VFR- und IFR-Piloten ähneln und überschneiden sich. Alle Piloten benötigen eine fundierte Kenntnis der Wetterlage, aktuelle Wettermeldungen, zuverlässige Flugwettervorhersagen und eine Kenntnis über mögliche flugmeteorologische Gefahren. Um die Wetterlage zu verstehen, sollte ein Pilot vor Flugantritt eine *Significant Weather Chart* (SWC) studieren. Diese SWCs gibt es für den Sichtflug und den Instrumentenflug als Low Level Chart für den Höhenbereich Boden – *Flightlevel* (FL) 245. Diese Karten gibt es aber auch für Verkehrsflugzeugführer für Höhenbereiche über FL100, darüber später.

Die LL SWC (*Low Level Significant Weather Chart*) wird von der LBZ Mitte, beziehungsweise der LBZ Nord erstellt und muss, wegen ihres hohen Informationsgehaltes, besonders hervorgehoben werden. Die Karten werden im

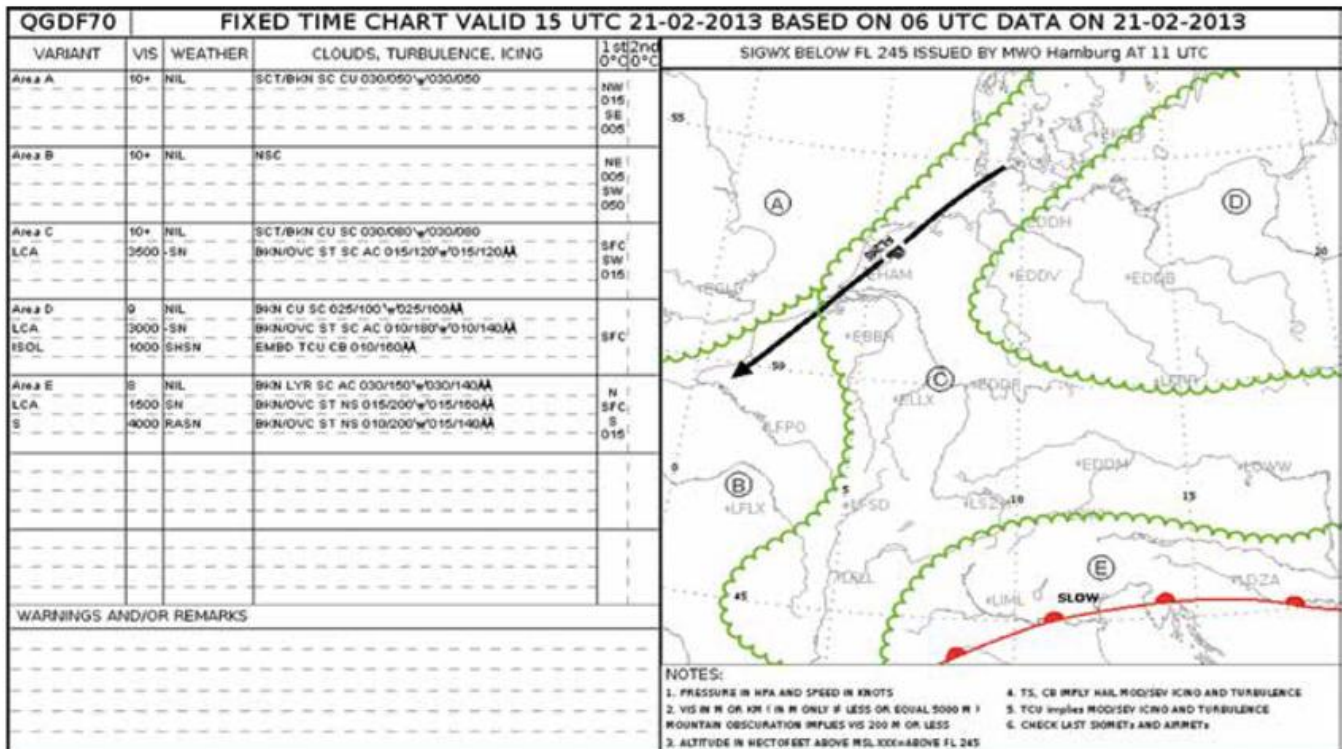


Abb. 6-1: Die LL SWC des DWD enthält nahezu alle Informationen, die ein Pilot für die Flugplanung benötigt. Auf der rechten Seite der Karte werden Gebiete mit den gleichen meteorologischen Bedingungen zusammengefasst und mit einem Buchstaben versehen. Auf dieser Karte erkennt man eine Warmfront über Italien (E), die sich langsam nach Norden verlagert. Über der Nordseeküste befindet sich im Bereich des FL245 ein Jetstream. Im linken Kartenteil werden Sichtweite, Wettererscheinungen, Wolken und mögliche Gefahren beschrieben sowie Angaben über die Nullgradgrenze gemacht.

Drei-Stunden-Rhythmus erstellt und gegebenenfalls auch amendiert. Die LL SWC ist somit sehr nahe am aktuellen Wettergeschehen. Außerdem enthält sie eine Fülle von Informationen. Auf der LL SWC findet man die Lage von Bodenfronten sowie deren Verlagerungsrichtung und -geschwindigkeit. Sie zeigt außerdem die Position der steuernden Hoch- und Tiefdruckgebiete und deren Verlagerungstendenz. Wolkengattungen, sowie Wolkenunter- und

Obergrenzen werden genannt, natürlich auch besondere Wettererscheinungen und die Sichtweite. Ferner, und unabdingbar für IFR-Flüge, wird die Höhe der Nullgradgrenze beschrieben, Turbulenz- und Vereisungszonen sowieso, gegebenenfalls auch Jetstreams mit CAT (Clear Air Turbulence). In einem Textfeld kann der Wetterberater auf zusätzliche flugmeteorologische Gefahren hinweisen. Vieler dieser Informationen findet man auf der sogenannten medium SWC (das ist die SWC für den Höhenbereich FL100/450), wie sie von Verkehrspiloten genutzt werden nicht, weil sich diese Karte mehr mit den meteorologischen Gefahren in der Reiseflughöhe beschäftigt.

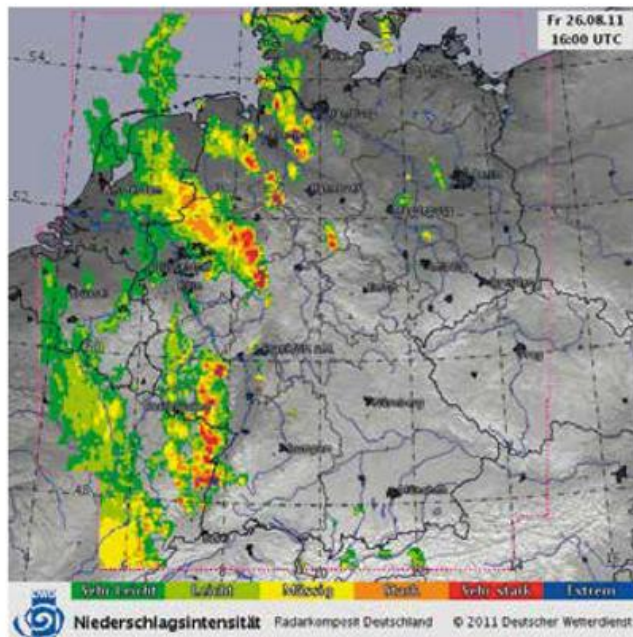


Abb. 6-2: Beispiel für ein Radarkomposit für ganz Deutschland.

Wetterkarten, wie die SWCs, bestehen aus internationalen Abkürzungen und Wettersymbolen. Um Interpretationsfehler zu vermeiden, gibt es ergänzend die Flugwetterübersicht, eine textbasierte Wetteranalyse und Vorhersage speziell für die Belange der Luftfahrt.

Die Wetterkarten werden von Radar- und Satellitenbildern (siehe Abb. 7-2), die für ganz Europa zur Verfügung stehen. Der Kunde kann sich hochaufgelöste Einzelbilder anschauen als auch „Loops“ (Sequenzen von Bildern) einstellen mit deren Hilfe er die Entwicklung und Verlagerung von Schlechtwettergebieten zu erkennen und zu beurteilen vermag.

Ein anderer Bericht, mit dem sowohl Sicht- als auch Instrumentenflieger rasch in die Wetterlage eintauchen können, ist der GAMET (General Aviation Meteorological

Report). Der GAMET enthält praktisch alle Informationen, die ein Pilot für die Flugdurchführung benötigt. Dieser Bericht wird für die deutschen Fluginformationsgebiete erstellt, aber auch für Schweiz FIR (englisch für: *Flight Information Region*), Wien FIR und weitere Bereiche. Im Teil 1 werden flugmeteorologische Gefahren beschrieben, die als mäßig eingestuft werden, oder die vor allem die Belange der Sichtfliegerei betrifft. Im Teil zwei werden die Wetterlage beschrieben, Wind und Temperaturen in Standardhöhen genannt, die Wolkengattungen werden mit ihren Unter- und Obergrenzen aufgelistet, der Verlauf der Nullgradgrenze wird erläutert und es wird die Entwicklung des Luftdrucks angegeben. Ein Mehr an Information, zumindest in dieser gebündelten Form, ist fast nicht mehr möglich. Leider erreicht dieser Bericht dennoch nicht die erwartete Akzeptanz. Dies mag daran liegen, dass der GAMET eine reine Textvorhersage mit den üblichen Abkürzungen ist.

### 3 Warnungen und Extremwetterprodukte

Grundsätzlich besitzen Flugwetterwarnungen für die Flugvorbereitung die höchste Priorität. *pc\_met* stellt den Kunden per Knopfdruck sämtliche Flugwetterwarnungen bereit: SIGMET, AIRMETs, GAFOR-Gebietswarnungen, Flughafenwarnungen, aber auch PIREPs (Wetterbeobachtungen von Piloten im Flug).

Die wichtigste Warnung stellt das SIGMET (**SIGN**ificant **METE**orological Phenomena) dar, denn es warnt vor *severe flight hazards*, zum Beispiel vor starker Vereisung, starker Turbulenz oder linienartigen Gewittern. Diese Warnungen werden sowohl für Fluginformationsgebiete zwischen Boden und FL245 als auch für obere Fluginformationsgebiete (englisch: *Upper flight Information Region*, UIR) erstellt.

AIRMETs (**AIR**man's **METE**orological Information) warnen vor *moderate flight hazards* oder beziehen sich auf die Belange von Sichtfliegern (Sichtweite, Wolkenuntergrenzen, usw.) Sie werden für den Bereich Boden/FL150 erstellt, allerdings nur dann wenn die Wetterphänomene nicht im GAMET bereits angegeben sind. Wobei wir bei einem kleinen Manko angelangt wären. Da ein GAMET bis FL100, maximal bis FL150 reicht (gilt für GAMET Langen und München), sind keine aktuelle Warnungen über mäßige flugmeteorologische Gefahren (zum Beispiel mäßige Vereisung oder mäßige Turbulenz) für den Bereich oberhalb FL150 verfügbar. In diesem Bereich gibt es für die ICAO Verbesserungsbedarf.

Gewitterlagen bereiten Piloten auch heute noch besondere Probleme. Man kann Gewitter nicht verhindern, aber man kann Gewitterzellen auf Satelliten- und Radarbildern schnell entdecken und ihre Zugrichtung bestimmen. Für ein ungeschultes Auge ist die Interpretation von Radar- und Satellitenbildern eine Herausforderung. Daher stellt der DWD seinen Kunden Blitzkarten zur Verfügung. Diese

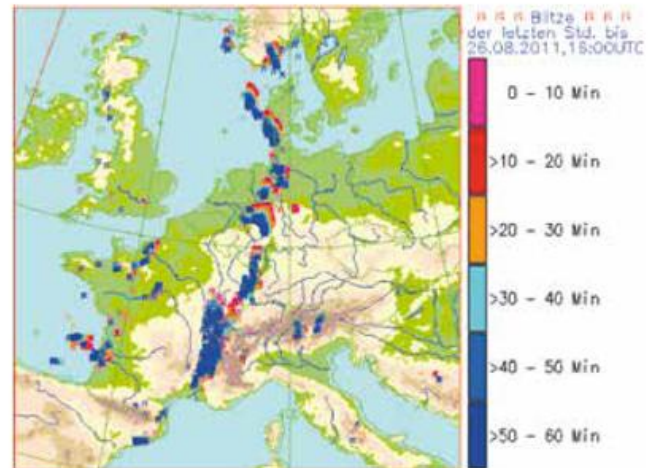


Abb. 6-3: Um Gewitterflüge zu vermeiden, sind Blitzkarten heute unverzichtbar geworden. Blitzkarten geben auch Aufschluss darüber, ob und wo sich Lücken zwischen den Gewitterzellen aufturn.

Karten beruhen auf einem erdgebundenen Ortungssystem und folgen dem Prinzip der Laufzeitdifferenz der vom Blitz ausgesandten elektromagnetischen Impulse. Mehrere Bodenstationen lokalisieren den Blitz. Über die Frequenz der Blitzentladungen wird auf die Intensität eines Gewitters geschlossen.

In der Instrumentenfliegerei wird größter Wert auf die Höhe der Nullgradgrenze gelegt, um der Gefahr der Flugzeugvereisung zu entgehen. Der Verlauf des *freezing levels* wird daher in verschiedenen Produkten routinemäßig beschrieben. *pc\_met* stellt Vereisungsprognosen für den europäischen Luftraum zur Verfügung. Das Produkt heißt ADWICE und prognostiziert für drei Tage im Stundentakt die Vereisungsintensität, weist auf die gefährdeten Höhenbereiche hin und beschreibt die Verlagerung der Vereisungszonen. Es enthält ferner Angaben ob die Bewölkung stratiform oder konvektiv ist und lässt somit Rückschlüsse auf die Vereisungsart zu. Die Darstellung ist farblich einfach gehalten, das Produkt ist quasi selbst-erklärend.

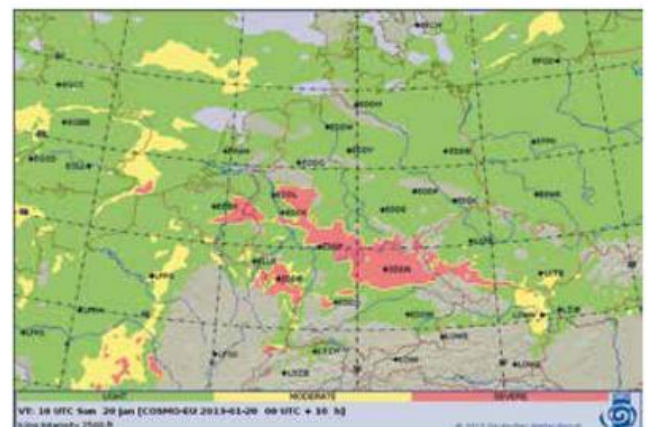


Abb. 6-4: Die schlimmsten wetterabhängigen Unfälle beim Instrumentenflug sind auf starke Flugzeugvereisung zurückzuführen. ADWICE, eine Vereisungsprognose im Stundentakt, hilft Flugunfälle zu vermeiden. Grüne Bereiche deuten auf leichte Flugzeugvereisung hin, gelbe Regionen sind von mäßiger Vereisung betroffen und rote Gebiete signalisieren starke Vereisungsgefahr.

#### 4 Punkt- und Streckenwetterprodukte

Der reine Sichtflieger wird sich vornehmlich für den Wind, die Sichtweite, das aktuelle Wetter und die Wolkenuntergrenzen interessieren und selbstverständlich für deren Entwicklung. Gleiches gilt natürlich für den IFR-Piloten, der Wetterinformationen für seinen Abflug- und den Zielflughafen benötigt. Diese Parameter werden in METARs und TAFs beschrieben. In der Rubrik „Aktuelles Flugwetter“ werden in *pc\_met* die METARs und TAFs aller europäischen Länder verbreitet. Mehr noch, der Kunde kann nicht nur auf die aktuellen Flughafenwettermeldungen zugreifen, es werden auch alle zur Verfügung stehenden Meldungen der Militärflugplätze zu Verfügung gestellt, sowie die synoptischen Wettermeldungen der Wetterstationen in den METAR-Code übersetzt. Bei der Flugvorbereitung braucht man nur noch den Abflughafen, den Zielflughafen und gegebenenfalls den einen oder anderen Wegepunkt eingeben und fertig ist ein Streckenwetter. Die Windverhältnisse am Boden und in seiner Flughöhe findet der Pilot unter anderem hinter dem *pc\_met*-Button „Wind-Temperatur-Mittel-europa“.

Natürlich ist es schwierig, sich an Hand von METAR und TAFs das dreidimensionale Wettergeschehen vorzustellen. Eine Lösung für einen guten Überblick bietet *pc\_met* auf einer Deutschlandkarte mit einer grafischen Anzeige von Sichtweiten, Wetterscheinungen und Ceiling. Gepaart sind die Darstellungen mit einem Wetterradar, oder wahlweise mit einem Satellitenbild. Diese grafischen Darstellungen der

wichtigsten Sichtflugparameter fassen auf einen Blick zusammen, ob Flugminima über- oder unterschritten werden.

Ein Bericht der fast ausschließlich von VFR-Piloten benutzt wird, ist der GAFOR (*General Aviation Forecast*). Er wird seit vielen Jahren zur Flugvorbereitung benutzt und erfreut sich auch weiterhin großer Beliebtheit, weil einfach zu verstehen. Deutschland wird in 68 topographisch ähnliche Gebiete eingeteilt. Für diese wird eine Vorhersage für 6 Stunden bezüglich Sichtweite und Wolkenuntergrenze erstellt. Die Vorhersage ist in drei Zweistundenintervallen unterteilt. Je nach Flugbedingungen wird ein Gebiet quasi nach dem Ampelprinzip eingefärbt. Rot heißt „Stop“, grün steht für „Freie Fahrt“, usw. Natürlich sind für die einzelnen Einstufungen genaue Vorgaben zu beachten. Rot bedeutet zum Beispiel Sichtweite unter 1,5 km und/oder eine Ceiling unter 500 ft über einer für das Gebiet genau definierten Bezugshöhe. *pc\_met* stellt einen GAFOR für Norddeutschland, Mitte und Süddeutschland zur Verfügung. Auch für die Anrainerländer Frankreich, Schweiz und Österreich wird ein GAFOR angeboten, diese Berichte sind jedoch etwas anders aufgemacht.

Beim Web-GAFOR werden für die einzelnen Gebiete zusätzlich auch eventuell auftretende Wettererscheinungen genannt. Allein in der GAFOR-Tabelle für Süddeutschland können bis zu 216 Informationen stehen. Hinzu kommen noch Wetterlage und Wetterentwicklung, Wettergeschehen, Wind- und Temperaturverhältnisse, Hinweise zu Vereisung und Turbulenz.

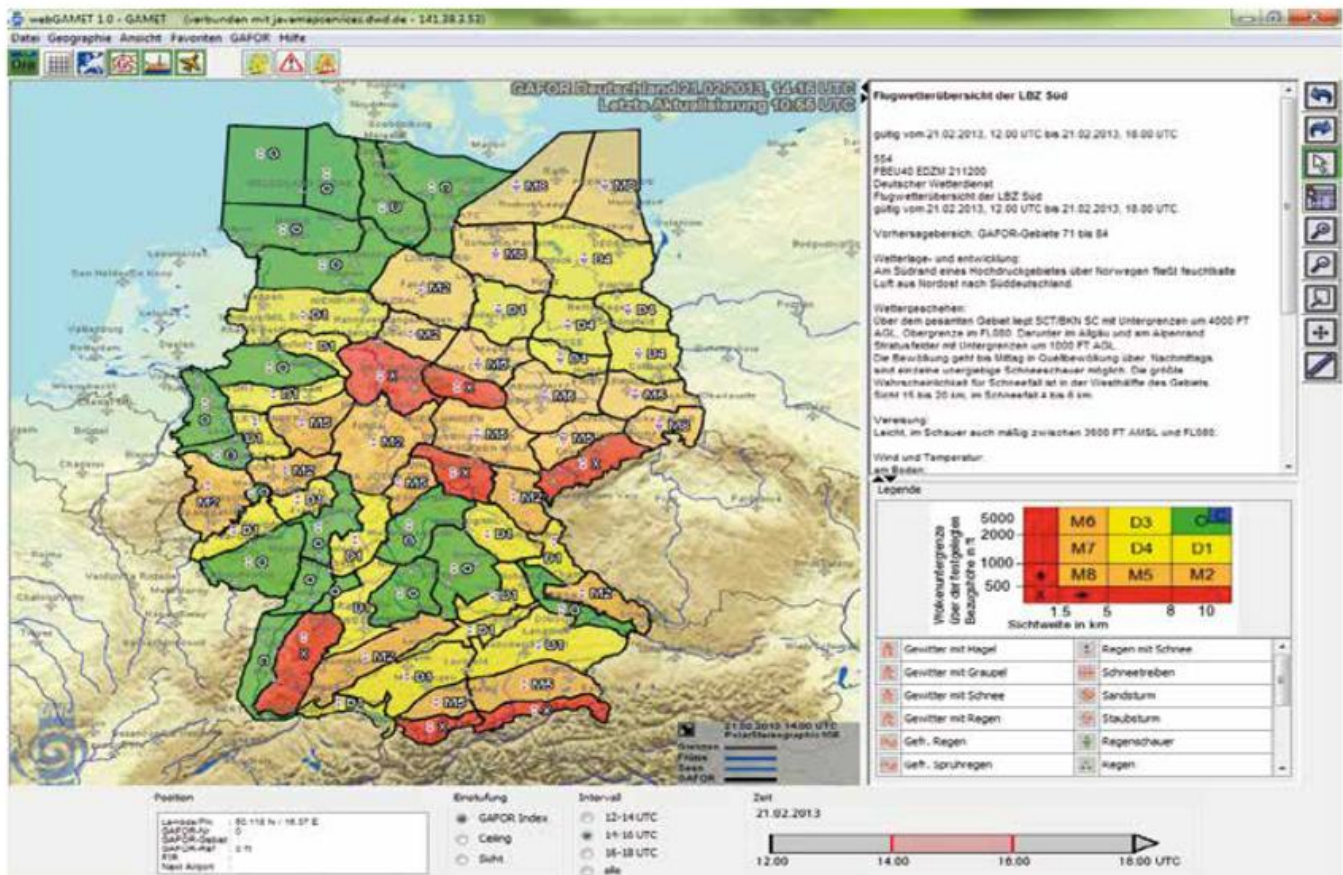


Abb. 7-5: Vor allem bei Sichtfliegern ist der GAFOR nach wie vor einer der beliebtesten Beratungsunterlagen.

## 5 Informationssysteme

Ergänzend zu Web-GAFOR steht SkyView in der Gunst der Kunden. Dieses Produkt stellt in *pc\_met* verschiedene Parameter wie Wetter, Konvektion, Wind und Bewölkung zum aktuellen Zeitpunkt aber auch für die nächsten drei Tage im Stundentakt in einer interaktiven Grafik dar. Man wählt sich die Uhrzeit aus und erfährt auf Knopfdruck wo in Europa Niederschlag, Gewitter oder Nebel erwartet wird. Das gleiche gilt für die Windverhältnisse vom Boden bis FL180 und zwar sowohl für die für Sichtflieger als auch für die für Geschäftsflieger üblichen Flughöhen. Um eine bessere Auflösung zu erreichen, kann sich der Pilot in die Karte zoomen und einen für ihn günstigen Ausschnitt bestimmen. SkyView ist ein Instrument mit dem der erfahrene Pilot seine Flüge auch einige Tage im Voraus planen kann.

Eine benutzerfreundliche aber wegen der Informationsdichte auch anspruchsvolle Darstellung des Flugwetters stellen die Vertikalschnitte (*Cross-Sections*) dar, die es für 26 festgelegte Flugrouten in Europa gibt. Zwei Bilder, ein Vertikalschnitt und eine Karte, beschreiben die Bewölkungs- und Windverhältnisse zwischen Boden und FL240.

## 6 Spezielle Produkte

Vor allem Ballonfahrer und Segelflieger sind mit ihren Fluggeräten dem Spiel der Luftmassen ausgesetzt. Segelflieger und Ballonfahrer werden deshalb mit speziellen Wetterberichten bedient. Darüber hinaus gibt es noch ganz spezielle Wetterkarten, die fast nur von Segelfliegern genutzt werden können: Konvektionskarten, Leewellenvorhersagen, vor allem aber TOPTHERM mit TOPTASK.

Mit Hilfe der Konvektionskarte erhält der Pilot eines Segelflugzeugs zunächst einmal ein grobes Gesamtbild. Die Höhe der Konvektion wird farblich dargestellt und auch zwischen Wolkenthermik und Blauthermik unterschieden. Abschirmende Bewölkung und Niederschlag stechen ins Auge. Für den aktuellen Tag kann man sich die thermischen Verhältnisse im Stundentakt anzeigen lassen, für 3 Folgetage im Dreistundenrhythmus.

Für die Feinanalyse wird TOPTHERM benutzt. Es ist ein Programm zur Berechnung der Thermikgüte in den verschiedenen GAFOR-Gebieten und berechnet die Höhe der Cumulusbasis, den Bedeckungsgrad und die Aufwindstärke. Außerdem ermittelt es die potentielle Flugdistanz.

Der DWD stellt Leewellenvorhersagen für den Bereich 500 m bis 8000 m AMSL für Deutschland zur Verfügung. Diese Vertikalwindvorhersage deckt den aktuellen Tag und den Folgetag ab. Der Segelflieger weiß, dass die Wellenlänge von atmosphärischen Schwerewellen von dem vertikalen Temperaturgradienten und von der Windgeschwindigkeit abhängt und er weiß, dass sie in Deutschland in der Größenordnung von 6 bis 10 km liegen. Um solch kleinräumige

Phänomene mit Hilfe von Vorhersagemodellen simulieren zu können, muss deren räumliche Auflösung besonders hoch sein, das heißt die Maschenweite des Gitternetzes, auf dem das Modell rechnet, muss möglichst klein sein. Das Vertikalwindprodukt basiert deshalb auf dem COSMO-DE-Modell des DWD, das eine horizontale Maschenweite von 2,8 km hat. Diese reicht aus, um Schwerewellen mit der für die praktische Anwendung notwendigen Qualität simulieren zu können.

Ballonfahrer benötigen zudem häufig das direkte Gespräch mit den Spezialisten der Luftfahrtberatungszentralen, zum Beispiel wenn es bei Nordlagen um Alpenüberquerungen geht. Die für Ballonfahrer speziell bereitgestellten Wetterberichte befassen sich prioritär mit der Windentwicklung. Ein Mausklick im *pc\_met* genügt, um Aufschluss über die Windverhältnisse zwischen Boden und 2000 m AMSL zu erhalten. Zusätzlich können Ballonfahrer mit Hilfe ihrer Mobiltelefone einen sogenannten Ballonticker abrufen, der mehrmals am Tag auf Abweichungen zum Ballonbericht aufmerksam macht.

Eine besonders wichtige Aufgabe des Flugwetterdienstes ist die individuelle Betreuung von SAR-Flügen (Search and Rescue). Pilot und Flugwetterberater stehen hierbei in engem telefonischem Kontakt. Die Flugwetterberater beraten den Flug vom Start bis zur Landung. Die flugmeteorologischen Informationen, die hierbei fließen, müssen so exakt wie nur irgend möglich sein, denn hier geht es in der Regel um die Rettung von Menschenleben. Weil Transplantate häufig nachts geflogen werden, Personen überwiegend nachts mit Helikoptern und Infrarotkameras gesucht werden und sich schwere Unfälle ebenfalls oft nachts ereignen, erstellen Flugwetterberater täglich mehr und mehr Vorhersagen für Nachtflüge mit Bildschirmverstärkerbrillen, so genannte BIV-Berichte, und senden diese an Polizei und Rettungsdienste. Die Verantwortung die sich mit diesen Vorhersagen verbindet ist evident und sei mit folgender Anekdote belegt: Vor einigen Jahren sollte ein Rettungsdienst nach Karlsruhe fliegen um dort ein Spenderherz in Empfang zu nehmen und es sofort nach München-Großhadern transportieren, wo der Empfänger bereits auf seine Operation wartete. Der Flugwetterberater gab für den Flug grünes Licht. Während des Fluges verschlechterte sich das Wetter aber dermaßen, dass sich der Berater gezwungen sah, im Krankenhaus in Karlsruhe anzurufen, mit der Bitte, man möge den Hubschrauberpiloten doch sagen, er solle zurückrufen, denn er könne bei diesen Wetterbedingungen den Rückflug wahrscheinlich nicht durchführen. Der uns nach wie vor gut bekannte Rettungsflyer meinte aber nur: „Die homm des Herz etzat scho ausbaut. Ih muas z'ruck. Und Du sogst mir jetzt wie!“ - Die Operation glückte, Patient lebt noch immer.

## 7 Mittelfristvorhersagen

Bislang wurden hauptsächlich meteorologische Informationen genannt, die für die aktuelle Flugplanung zur Verfügung stehen. Selbstverständlich will der Pilot einige Tage

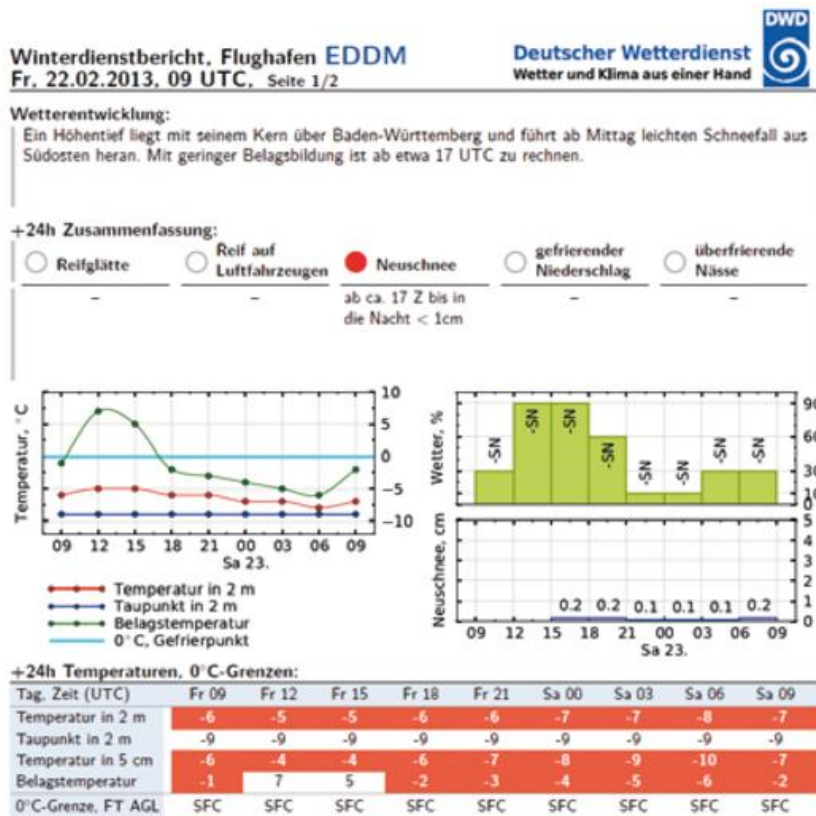


Abb. 7-6: Die Winterdiensttabelle hilft der Flughafengesellschaft rechtzeitig auf schweres Wetter zu reagieren.

vorausplanen. Auch daran ist in *pc\_met* gedacht worden. Es wurden bereits die Vorhersagezeiten genannt, mit denen eine ganze Reihe von Vorhersageprodukten ausgestattet sind, zum Beispiel Sky View, Konvektionskarten, ADWICE und vieles mehr. Darüber hinaus gibt es Drei-Tagesprognosen, die die Wetterlage und die flugmeteorologischen Bedingungen für Motorflieger, aber auch Ballonfahrer und Segelflieger für Deutschland beschreiben.

Meteogramme auf der Basis des Modells COSMO-EU sind ebenfalls Vorhersagen über drei Tage. Diese grafischen Darstellungen gibt es für eine Vielzahl deutscher und europäischer Städte. Sie beinhalten Vorhersagen bezüglich Winden, Temperaturen in verschiedenen Höhen, Luftdruck, Wettererscheinungen und Niederschlagsmengen.

### 8 Fazit

Über *pc\_met* kann die Verkehrsluftfahrt alle notwendigen meteorologischen Unterlagen abrufen. Zum Standardbriefing für die Verkehrsluftfahrt gehören:

- Die SWC (*Significant Weather Chart*). Bei Inlandsflügen die SWC für den Höhenbereich FL100/450, bei Langstreckenflügen die *High-Level-SWC* (zum Beispiel für die Nordatlantikroute der Bereich FL240/FL630). Diese Karten werden vom WAFC (*World Area Forecast Center*) in London erstellt und von den nationalen Wetterdiensten verbreitet.
- Wind- und Temperaturkarten für ausgewählte Flugflächen bis hinauf zu FL530.

- Die TAFs für den Zielflughafen, den Ausweichflughafen und für ausgewählte Flugplätze entlang der Flugroute und zwar innerhalb einer Korridorbreite von 120 Nautischen Meilen.
- SIGMETs, also Wetterwarnungen bezüglich *severe flight hazards*.
- Eine aktuelle Bodenwetterkarte, welche wegen der in ihr enthaltenen Bodenfronten bei den Verkehrspiloten zunehmend beliebt ist, seit vor einigen Jahren die Bodenfronten aus der SWC verschwanden. Ob signifikante Bewölkung mit einer stabilen Warmfront oder einer labilen Kaltfront zusammen hängt, ist für einen Piloten von großer Bedeutung.

Nicht nur in der Luft, auch am Boden bereitet das Wetter dem Luftverkehr immer wieder Ärger. Eine Nebellage im Herbst kann für unangenehme Verspätungen sorgen, die Passage einer Gewitterfront führt nicht selten zur Streichung von Flügen. Heftiger Schneefall im Winter kann eine Landung auf einem Ausweichflughafen erzwingen; ein Ausflug, den keiner will.

Bei kritischen Wetterlagen, zum Beispiel bei gefrierendem Regen oder starkem Schneefall, sind die Verkehrsleitungen der Flughäfen in Deutschland auf gute meteorologische Informationen angewiesen. Ohne die Luftfahrtberatungszentralen des DWD kann ein möglichst reibungsloser Betrieb nicht gewährleistet werden. Wetter wird dann beim Flug- und Flughafenbetrieb zu einem großen Kostenfaktor. Ein Tag mit *freezing rain* kann einen einzelnen großen Flughafen in Deutschland eine halbe Million Euro kosten. Aus diesem Grund werden die Flugwetterberaterinnen und Berater direkt in die Entscheidungsprozesse der Leitzentralen an den Flughäfen integriert. So können wichtige Informationen unmittelbar an Verkehrsleitung, Flugsicherung, Fluggesellschaften und andere Teilnehmer übermittelt werden und Missverständnisse ausgeräumt werden.

Das Berufsbild des Flugwetterberaters ändert sich. Neben einer Vielzahl von standardisierten Wettervorhersagen und Warnungen, stellen heute die Flugwetterberaterinnen und Berater nutzergerecht hochspezialisierte Beratungen bereit, nicht allein um ein Höchstmaß an meteorologischer Sicherheit zu erreichen, sondern auch um den Fluggesellschaften, Flugsicherungen und Flughäfen einen pünktlichen wirtschaftlichen und umweltschonenden Betrieb zu ermöglichen. Wenn Piloten und andere Nutzer bei einer Luftfahrtberatungszentrale anrufen, so können die Kunden erwarten, dass sie von den Flugwetterberaterinnen und Beratern mehr erfahren, als allein aus *flugwetter.de* oder ähnlichen Briefingsystemen zu entnehmen ist.

D. DANIEL, R. HEISE, D. THIEL

# 7 Geoinformationsberatung in Einsatzgebieten der Bundeswehr

## Geoinformation Advisory Service for Worldwide Military Missions and Operations of the German Federal Armed Forces

### Zusammenfassung

Der **Geoinformationsdienst** der **Bundeswehr** (GeoInfoDBw) deckt den Bedarf der Streitkräfte an weltweiten Geoinformationsdaten und -produkten. Schwerpunkte der Geoinformationsunterstützung der Luftwaffe in Einsatzgebieten der Bundeswehr sind Aufgaben der Wetterbeobachtung und der Flugwetterberatung für Waffensysteme, Plattformen, Effektoren und Sensoren. Vor allem die Beratung taktischer Missionen erfordert die Entwicklung flugmeteorologischer Vorhersageprodukte mit hoher raum-zeitlicher Auflösung. In diesem Artikel werden die Besonderheiten und Herausforderungen der Flugwetterberatung und Wetterbeobachtung im Rahmen der **International Security Assistance Force (ISAF)** Mission in Afghanistan beschrieben. In diesem Zusammenhang wird anschließend auf die Modellkette des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr eingegangen, es werden Anschlussverfahren beschrieben sowie spezielle Verfahren zur Prognose flugmeteorologische Parameter. Am Ende des Beitrages wird auf die Entwicklung und Nutzung von unbemannten Drohnen (MET-UAS) und deren Verwendung zur meteorologischen Datengewinnung hingewiesen.

### Abstract

The **Bundeswehr GeoInformation Service (BGIS)** of the German Federal Armed Forces provides worldwide geoinformation data and products for all branches of the Armed Forces. For Air Force missions abroad, the main focus of geoinformation support is on weather observation and (flight-) weather forecasting for all weapon systems, platforms, effectors and sensors. Especially the advisory for tactical missions requires the development of flight-meteorological forecast products with a high spatial and temporal resolution. The following article describes the challenges of weather forecasting and observation within the **International Security Assistance Force (ISAF)** mission in Afghanistan. The article also goes into details of the numerical models of the BGIS and special procedures for the prognosis of flight-meteorological parameters. A paragraph regarding the development and operation of unmanned aerial systems (MET-UAS) and their utilization for meteorological data acquisition concludes this article.

## 1 Einführung

Das weltweite Einsatzspektrum der Bundeswehr erfordert eine lagebezogene Betrachtung und Bewertung der GEO-Faktoren hinsichtlich der Unterstützung der in den letzten Jahren zunehmend geführten multinationalen, streitkräfte-gemeinsamen sowie vernetzten Operationen. Der GeoInfoDBw berät dabei die Bundeswehr als geowissenschaftlicher Fachdienst auf der operativen, taktischen, bis hin zur militär-strategischen Ebene. Zur Beurteilung einsatzrelevanter Umwelteinflüsse und deren raumzeitlicher Auswirkungen auf die Operationsplanung beziehungsweise -durchführung werden alle erforderlichen Geowissenschaften, (unter anderem Geologie, Meteorologie, Hydrologie, Ozeanographie) aber auch Wissenschaftsbereiche wie Ökologie, Biologie und Ethnologie genutzt.

Der interdisziplinäre Ansatz der GeoInfo-Unterstützung der militärischen Streitkräfte erfolgt durch das GeoInfo-Personal darüber hinaus im Grundbetrieb in Deutschland sowie auf militärischen Übungen und humanitären Hilfseinsätzen.

Die querschnittliche GeoInfo-Beratung unterscheidet sich vor allem auf der taktischen Ebene grundlegend von den Beratungsanforderungen nationaler Flugwetterdienste. Dennoch ergeben sich allgemein Synergieeffekte zwischen dem GeoInfoDBw und dem Deutschen Wetterdienst (DWD), die bei der Entwicklung in der numerischen Wettervorhersage, bei Anschlussverfahren und bei der Harmonisierung meteorologischer Messnetze im Heimatland intensiv genutzt werden.

Im Rahmen der aktuellen Bundeswehrreform hat die Luftwaffe ihre bislang dezentrale GeoInfo-Beratungsunterstüt-



Abb. 7-1: Links: Sichttrübung (< 200 m) unterhalb einer stark ausgeprägten Inversionsschicht im Winter durch Rauch (Hausbrand) am Flugplatz Mazar-e Sharif. Rechts: Gleicher Bildausschnitt 30 Minuten später. Bildquelle: Bundeswehr.

zung zum 01.10.2013 in das Geoinformationszentrum der Luftwaffe, welches sich in Münster befindet, überführt und überwiegend zentralisiert.

Die meteorologische Beratung erfolgt in Deutschland im Grundbetrieb durch wissenschaftlich ausgebildetes Fachpersonal im Soldaten- oder Beamtenstatus nahe am Bedarfsträger – entweder zentral aus dem Geoinformationszentrum der Luftwaffe in Münster oder aus den direkt in die Streitkräfte integrierten, an Bundeswehrflugplätzen eingerichteten GeoInfo-Beratungsstellen – im Nowcasting und Kurzfristzeitraum bis 72 Stunden. Den Schwerpunkt bildet die einsatzbezogene „Face to face“ Beratung für den Flugbetrieb der Bundeswehr per Videotelefonkonferenz oder vor Ort. Sie gliedert sich in die gesetzlich vorgeschriebene Flugwetterberatung zur Gewährleistung der Flugsicherheit und die bewaffnungs-, waffensystem- und einsatzbezogene Beratung zum optimalen Sensor- beziehungsweise Waffeneinsatz. Zusätzlich werden Meteorologen und Wetterberater in Kommandobehörden und militärischen Zentren sowie in Wetterzentralen der Teilstreitkräfte (Heer, Luftwaffe, Marine) eingesetzt. Die meteorologische Vorhersagezentrale des Zentrums für Geoinformationswesen der Bundeswehr (ZGeoBw) in Euskirchen bearbeitet hingegen überwiegend den mittel- und langfristigen Zeitraum für militärische Planungszwecke.

Nachfolgend wird exemplarisch auf die flugmeteorologischen Besonderheiten und Beratungsanforderungen für das aktuelle Einsatzgebiet Afghanistan eingegangen.

## 2 Wetterbeobachtung und Flugwetterberatung im Einsatzgebiet Afghanistan

Die Bundeswehr ist seit fast zwölf Jahren am Hindukusch im Rahmen der International Security Assistance Force (ISAF) unter NATO-Führung im Einsatz. Von Anfang an dabei: Wetterbeobachter und Meteorologen/Wetterberater des GeoInfoDBw, seit Beginn in Termez (Usbekistan), bis

2005 im Hauptquartier der ISAF in Kabul, später auch in Kunduz (bis Mitte 2013), in Fayzabad (bis Ende 2012) und seit 2005 in Mazar-e Sharif (MES) im Norden Afghanistans. Der zivil und militärisch genutzte Flughafen MES wird durch die Bundeswehr betrieben und verzeichnete im Jahr 2012 mit über 55 000 Flugbewegungen ein Verkehrsaufkommen in der Größenordnung des Flughafens Hannover. Um auch im Einsatzgebiet die militärischen Belange einer einsatzbezogenen Flugwetterberatung zu berücksichtigen, findet dort für den Einsatzflugbetrieb nach Möglichkeit immer eine Wetterberatung durch speziell ausgebildete Wetterberatungsoffiziere statt.

Das Klima in Afghanistan ist kontinental-subtropisch geprägt. In den Hochlagen des Hindukusch herrscht Hochgebirgsklima. So beeinflussen im Winter (Dezember bis März) im sonst trockenen Afghanistan verbreitet Niederschläge und tiefe Bewölkung den Flugverkehr, wohingegen im Sommerhalbjahr Temperaturen jenseits der 40 °C -Marke zu Beeinträchtigungen der Leistungsfähigkeit von Luftfahrzeugen und Personal führen. Im Frühjahr (insbesondere von April bis Anfang Juni) kommt es vor allem im östlichen Bergland des Hindukusch immer wieder zu teils heftigen Gewittern mit Starkniederschlägen, wobei konvektive Multizellen (MCS – *Multiple Convective System*) und Überentwicklungen der Gewitterzellen keine Seltenheit sind. Darüber hinaus werden in den meisten Monaten des Jahres immer wieder starken Einschränkungen durch Staub und Sand beobachtet. Die Abbildung 7-1 verdeutlicht, wie ausgeprägte Grenzschichtinversionen und Windgeschwindigkeiten von 25 bis 35 km/h ausreichen, um zu Bodensichteinschränkungen von unter 200 m zu führen. Daher ist eine ununterbrochene bedarfsgerechte und bedarfsorientierte Wetterberatung für die Einsatzmissionen notwendig.

Die GeoInfo-Beratungsstelle in MES ist im 24/7-Schichtdienst rund um die Uhr, 365 Tage im Jahr besetzt. Dazu steht folgendes Personal zur Verfügung: vier Soldaten als Wetterberater inklusive Teileinheitführer und vier weitere Soldaten als Wetterbeobachter.

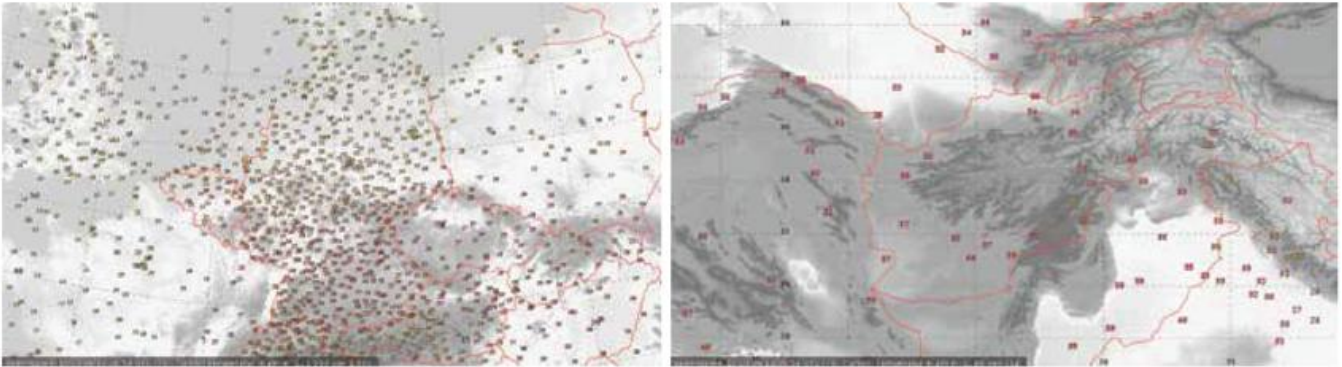


Abb. 7-2: Vergleich der Dichte der Verteilung von Bodenwetterstationen in Deutschland beziehungsweise Europa und im Einsatzgebiet Afghanistan am Beispiel der 2-Meter-Temperaturen vom 18.06.2013. Die Stationsdichte in Afghanistan entspricht nur etwa 2 % der Stationsdichte in Deutschland. Bildquelle: Bundeswehr, GGS NinJo-Fachsystem.

Die wichtigsten Bedarfsträger der Wetterberatung sind:

- alle fliegenden Einheiten der ISAF (unter anderem UH-60 Black Hawk Hubschrauber der US Army, C-130 Hercules und Super Puma der königlichen schwedischen Luftwaffe (RSAF), F-16 Kampffjets der niederländischen Luftwaffe (KLu) sowie AWACS-Flugzeuge (*Airborne Early Warning and Control System*),
- unbemannte Drohnen (*Unmanned Aircraft Systems - UAS*),
- PA 200 TORNADO - Aufklärungsjets (bis 2010),
- Transportflugzeuge: C-160 Transall,
- Transporthubschrauber CH53, NH-90 sowie Kampfhubschrauber TIGER,
- Stab Regional Command North (RC-North = deutscher Verantwortungsbereich),
- Feldjägerkräfte,
- Objektschutzkräfte,
- *Special Forces*, etc.

Die Liste zeigt, dass die Wetterberatung im Einsatzland Afghanistan eine große Herausforderung für einen Meteorologen beziehungsweise Wetterberater darstellt und es kaum eine vergleichbare Beratungstätigkeit in Deutschland gibt. Zum einen wegen der Vielfalt unterschiedlichster Luftfahrzeuge (Hubschrauber, Transportflugzeuge, Jets und UAS), die gleichzeitig (auch zeitgleich) zu beraten sind und aufgrund der Rahmenbedingungen (unter anderem unkontrollierte Lufträume, Sicherheitsbestimmungen), der unterschiedlichen Minima (Sicht/Wolkenuntergrenze) auf den verschiedenen Flugplätzen und des grenzüberschreitenden Flugbetriebes (unter anderem nach Usbekistan) mit zusätzlichen Besonderheiten (Wechsel der Flughöhe, Sichtflugbedingungen); siehe LÖFFLER et al. (2011). Neben der flugmeteorologischen Beratung und Überwachung des täglichen Flugbetriebes, ist eine weitere wichtige Aufgabe die Beratung des Stabes des Regional Command North (RCN) sowie der Wetterwarndienst für den gesamten Norden Afghanistans und den Luftwaffentransportstützpunkt Termez.

Sind für die Beratung des Stabes RCN eher Mittelfristvorhersagen von Interesse, so bildet für die operationelle und taktische Flugwetterberatung das Nowcasting beziehungsweise die Kurzfristvorhersage die Grundlage.

Das Nowcasting stellt in der Regel die genaueste Form der Vorhersage dar, ist jedoch sehr stark abhängig von der Dichte der Wetterbeobachtungsstationen und der Qualität dieser Beobachtungen. Im Einsatzgebiet von Afghanistan sind diese Voraussetzungen alles andere als optimal. Wie in Abb. 7-2 zu sehen ist, melden auf einer vergleichbaren Fläche viel weniger Stationen als in Mitteleuropa. Zudem treten häufiger Ausfälle bei der Datenübertragung auf.

Speziell bei der winterlichen Niederschlagsvorhersage stellt dies vor allem für den Flugplatz MES eine besondere Herausforderung dar. In diesem Fall liegen zwischen dem Flugplatz und der nächsten repräsentativen synoptischen Bodenwetterstation in Richtung Westen (Hauptströmungsrichtung) etwa 500 Kilometer. Ähnlich verhält es sich mit Radiosondenstationen in Richtung Westen. Während es im Norden Afghanistans mit MES genau eine Radiosondenstation gibt liegt die nächste im Vorfeld zu MES ganze 670 Kilometer weiter westlich im Nordosten des Iran. Ein Niederschlagsradar steht in Afghanistan leider momentan noch nicht zur Verfügung, womit die Wetterberater lediglich über Satelliten- und Modelldaten zur Interpretation der Niederschlagssituation verfügen. Wettersatellitenbilder von Afghanistan liegen hauptsächlich von METEOSAT 7 vor, einer älteren Generation von Satelliten, welche nicht über die gleiche zeitliche und räumliche Auflösung verfügt, wie bspw. METEOSAT der in Europa genutzten zweiten Generation (MSG). Ergänzt werden diese Information durch GOES-EAST- (**G**eostationary **O**perational **E**nvironmental **S**atellite), NOAA- (**N**ational **O**ceanic and **A**tmospheric **A**dministration) sowie MODIS- (**M**oderate **R**esolution **I**magining **S**pectroradiometer) Aufnahmen.

Die Wetterbeobachtung am Flugplatz MES ist Teil der Flugsicherheit und wird ebenfalls im 24/7-Wechselschichtdienst wahrgenommen. Neben der Beobachtung und Messung der meteorologischen Parameter (Abb. 7-3) führt der diensthabende Wetterbeobachter täglich mindestens einen aerologischen Radiosondenaufstieg durch.

Zur Visualisierung der numerischen Modelloutputs wird das Fachsystem GGS (**G**emeinsames **G**rafisches **S**ystem) NinJo verwendet. Modelle, die zum Einsatz kommen, sind das globale Vorhersagemodell (GME) des DWD und das

noch höher aufgelöste, global verschiebbare regionale Modell RLM 11 (**R**egionales **L**okales **M**odell für den Bereich Afghanistan, Gitterweite 7 km, 40 Schichten) der Bundeswehr, welches auf Basis des COSMO-EU für Afghanistan adaptiert wurde. Zusätzlich steht für den deutschen Verantwortungsbereich im Norden Afghanistans das konvektionsauflösende RLMK (Basis COSMO-DE; Gitterweite 2,8 km, 50 Schichten) als Nestmodell zur Verfügung. Darüber hinaus können auch die Daten des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), GFS (Global Forecast System) und anderer Wetterdienste genutzt werden.

Es werden nahezu sämtliche für die einsatzbezogene Wetterberatung relevanten Parameter in hoher räumlicher Auflösung dargestellt und für die Vorhersage genutzt. Weil aus Gründen der Datenübertragungskapazität via Nachrichtensatellit nicht alle Vorhersagefelder übertragen werden können, stehen die meisten Modelldaten nur für 6 Stunden beziehungsweise 12 Stunden-Prognosezeitschritte zur Verfügung. Um diesen Mangel an zeitlicher Auflösung der Gitterpunktfelder aufzufangen, sind seit diesem Jahr die Modelldaten des hochauflösenden RLM 11 für Afghanistan alle 3 Stunden via Satellitenverteildienst vorhanden.

Die numerischen Modelle liefern in der synoptischen und regionalen Skala überwiegend überzeugende Ergebnisse. Defizite treten im lokal, orographisch stark gegliederten Gelände auf.

Bedingt durch das unzureichende Wetterbeobachtungsnetz fehlen im Vergleich mit dem COSMO-EU des DWD beim RLM Informationen über die vertikale Schichtung der Grenzschicht beziehungsweise die dort zusätzlich verwendeten AMDAR-Daten (**A**ircraft **M**eteorological **D**ata **R**elay, Messungen von Verkehrsflugzeugen).

Die meteorologischen Prozesse in engen, kleinräumigen Tälern können selbst mit 2,8 km horizontaler Auflösung modellmäßig noch nicht aufgelöst werden. Wenn in einem



Abb. 7-3: Klimagarten (Messfeld) im Feldlager Masar-e Scharif. Der Aufbau und Betrieb der Messgeräte orientiert sich am WMO/ICAO-Standard, Bildquelle: Bundeswehr.

solchen Umfeld kurzweilige Tröge in rascher Folge vom Kaspischen Meer über Turkmenistan kommend den Norden Afghanistan überqueren, werden bereits in den Anfangsbedingungen Position und Intensität dieser Tröge nur unzureichend genau beschrieben. Es ist daher manchmal schon überraschend, dass der Vorhersagelauf vier Tage vor einem Termin besser mit der Wirklichkeit übereinstimmt als der Vorhersagelauf zwei Tage vorher. Des Weiteren erscheint eine „normale“ Bodendruckanalyse aufgrund der Inhomogenität des Geländes (höchste Erhebung: Noshaq 7485 m und etwa 27 % des Landes über 2500 m Höhe NN) wenig sinnvoll. Auch andere Parameter wie die Windgeschwindigkeit werden oft systematisch unterschätzt, da thermisch induzierte Effekte (anabatische Windsysteme, Volumeneffekt des Gebirges) nicht hinreichend genau berücksichtigt werden. Dagegen werden großräumige skalige Niederschlagsprozesse vom Modell oft überschätzt. Kleinräumige lokale Starkniederschlagsereignisse werden dagegen nur selten erfasst.

Ein weiteres Beispiel für systematische Modellfehler in Anschlussverfahren (zum Beispiel Meteogramm-Erstellung) ist ein Algorithmus der verhindern soll, dass die Höhe über NN des Modellgitterpunktes zu stark von der wahren Höhe des Ortes abweicht ( $\leq 100$  m). Im Fall des Gitterpunktes MES betrug die Abweichung des Modellgitterpunktes  $0,77^\circ$  (etwa 86 km), das heißt der Modellgitterpunkt für MES lag im Grenzgebiet zu Usbekistan und Tadschikistan; DANIEL et al (2011).

Die Wetterberatung im Einsatzland Afghanistan stellt somit eine große Herausforderung für Meteorologen und Wetterberater dar. Optimierungsbedarf besteht vor allem im Bereich der Vorhersageverfahren und -methoden für die zahlreichen unbemannten Luftfahrzeuge (UAS, *Unmanned Aircraft Systems*). Hier ist es notwendig, den Beratern optimierte Vorhersagemethoden und Anschlussverfahren an die Hand zu geben, um die Beratung in diesem Bereich weiter zu entwickeln und zu verbessern (Stichworte: Vereisungsvorhersagen - vergleiche Kapitel 4.1 -, Konvektionsvorhersagen). Die Modellarchitektur muss für die jeweilige Region weiter angepasst werden. Die Bundeswehr benötigt für solche Einsätze noch höher aufgelöste Gefechtsfeldmodelle, als die bestehenden, verbunden mit einem modifizierten Datenassimilationsverfahren. Darüber hinaus sollte die Ausbildung über die Leistungsfähigkeit der numerischen Wettervorhersagemodelle verbessert werden.

### 3 Die Modellkette in der Numerischen Wettervorhersage des GeoInfoDBw

Mit dem Beginn erster Auslandseinsätze der Bundeswehr wurde auch Wert auf eine einsatzbezogene Beratung auf Grundlage eines selbst entwickelten numerischen Wettervorhersagemodells gelegt. Mit Hilfe des global verschiebbaren RBL-Modells (**R**elocatable **B**oundary **L**ayer Model, Gitterweite etwa 30 km; PRENOSIL et al. (2000)) erfolgten Beratungen für den Deutschen Unterstützungsverband So-

malia im Rahmen der UN-Operation UNOSOM (1993/1994), anschließend bei der Implementation Force (IFOR) beziehungsweise Nachfolgeoperation Stabilisation Force (SFOR) auf dem Balkan.

Der GeoInfoDBw arbeitet bei der Modellentwicklung sehr eng mit dem DWD zusammen. Der DWD betreibt eine Modellkette bestehend aus drei verschiedenen Modellen: das globale Modell GME, und die darin eingelagerten Lokalmodelle COSMO-EU und COSMO-DE. Die Bundeswehr betreibt seit Jahren die Lokalmodelle des DWD in einer weltweit verschiebbaren Version (RLM, RLMK) als Nestmodelle. Die seitlichen Randwerte werden vom GME zur Verfügung gestellt. Zurzeit werden insgesamt 10 RLMs für Einsatzzwecke gleichzeitig mehrmals pro Tag gerechnet. Hinzu kommen drei hochaufgelöste Gefechtsfeldmodelle (RLMK), die kontinuierlich weiterentwickelt werden.

Der DWD entwickelt in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Meteorologie ein neues globales, nicht-hydrostatisches Zirkulationsmodell ICON (Gitterweite 13 km, 91 Schichten) mit lokaler Gitterverfeinerung (6,5 km), das ab 2014 die Modelle GME und COSMO-EU ersetzen wird (ICON = *icosahedral non-hydrostatic model*). Die Bundeswehr nutzt in Zukunft das ICON-Modell mit bis zu zehn verschiebbaren, hochauflösenden Zoomfenstern. Drei der hochauflösenden Zoomfenster werden für die wichtigsten aktuellen Einsatzgebiete der Bundeswehr benötigt, sind daher zeitkritisch und müssen im jeweiligen Modellhauptlauf gerechnet werden. Für weitere Interessengebiete der Bundeswehr werden bis zu sieben dieser Fenster als Nestmodell im Anschluss an die Hauptläufe gerechnet. Darüber hinaus werden weiterhin bis zu zehn Gefechtsfeldmodelle auf Basis COSMO-DE beziehungsweise RLMK benötigt. Die Modellergebnisse werden auch für meteorologische Anschluss- und Spezialverfahren wie Staub-, Sandsturm-, Nebel-, Vereisungs- oder Turbulenzmodelle benötigt. Ebenso bilden sie die meteorologischen Eingangsparameter für bundeswehrspezifische Beratungsverfahren (Sensorik und Waffensysteme) sowie für zukünftige Wirkmodelle mit noch höherer Auflösung (zum Beispiel Städte und Flughäfen).

## 4 Anpassung von Anschlussverfahren

### 4.1 Vereisungsprognose ADWICE

Ende 2012 wurde das DWD-Nowcastingsystem „Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environ-

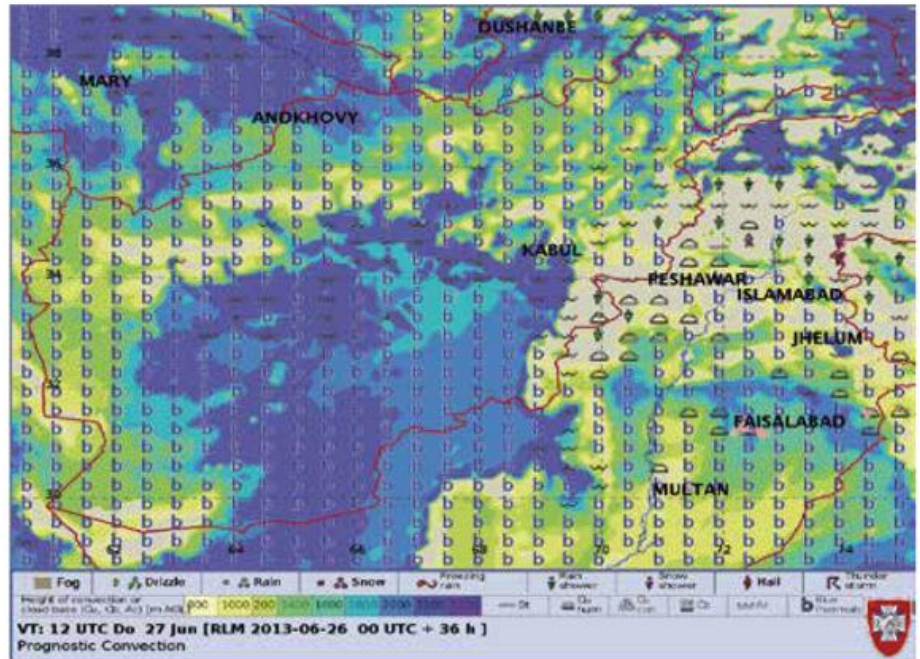


Abb. 7-4: Konvektionskarte auf Grundlage der RLM-Vorhersage für den 27.06.2013, 12 UTC.

ments“ (ADWICE) zur Erkennung vereisungsgefährdeter Lufträume in den Einsatzgebieten der Bundeswehr für die RLM-Modellregion Afghanistan adaptiert. Das COSMO-EU-Anschlussverfahren wird in diesem PROMET-Heft zusätzlich ausführlich vorgestellt. Der GeoInfoDBw verwendet auf Grundlage fehlender ausreichender aktueller Wettermeldungen beziehungsweise Wetterradarinformationen keine Vereisungsdiagnose sondern zunächst nur die modellbasierte ADWICE-Prognose. Zusätzlich können die Parameterfelder über NinJo-Batch in der Routine visualisiert und über GeoTIFF-Export in Geographische Informationssysteme (GIS) importiert beziehungsweise mit taktischen Layern kombiniert werden.

### 4.2 Konvektionsprognosen

Der Bedarfsträger der Teilstreitkraft Luftwaffe verlangt räumlich und zeitlich hochaufgelöste Vorhersagen vor allem der flugmeteorologischen Parameter Sicht, Wolkenunter- und -obergrenze, Bedeckungsgrad und gefährliche Wettererscheinungen (zum Beispiel Gewitter, gefrierender Niederschlag) für taktische Flüge im stark orographisch gegliederten Gelände. Bewährt haben sich Dank der Übersichtlichkeit die Konvektionskarten mit den Werten der Konvektionsparametrisierung des COSMO-EU (Abb. 7-4). Dargestellt werden in einer Kombinationskarte die Höhenangaben der Trockenkonvektion (entweder als Blauthermik oder mit entsprechender Wolkensymbolik (Cb hum, Cu con, Cb) beziehungsweise Schichtbewölkung über Grund sowie die am Gitterpunkt zu erwartende Wettererscheinung.

Der Wetterberater vor Ort kann mit Hilfe dieser Karte mesosynoptische Effekte (in Deutschland zum Beispiel Seewind, böhmischer Wind) besser prognostizieren, den tageszeitlichen Anstieg der Konvektion, den Bedeckungs-

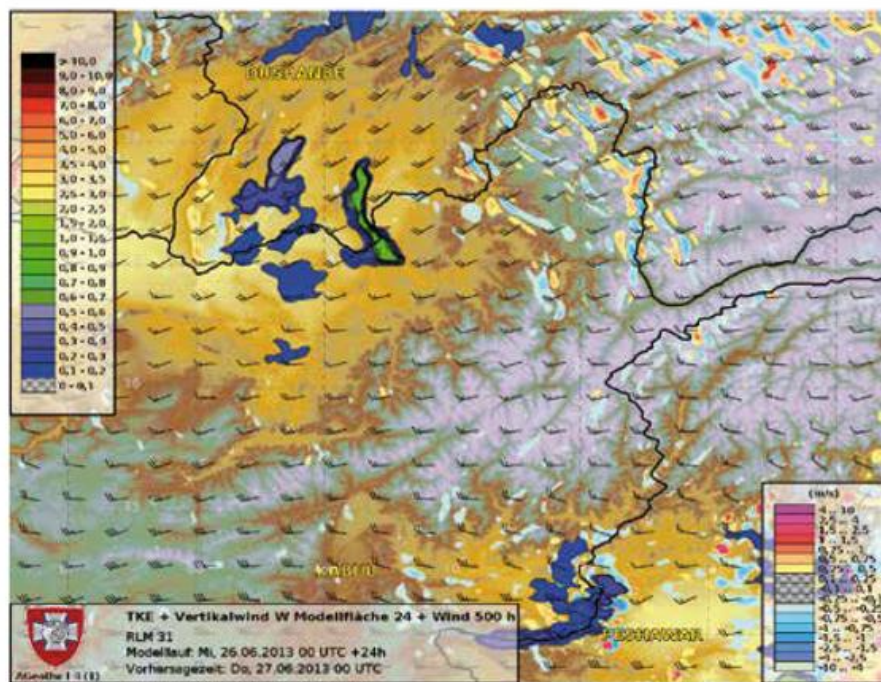


Abb. 7-5: Darstellung geordneter Vertikalbewegungsfelder (Vertikalwind, Legende rechts unten) und der turbulenten kinetischen Energie (TKE, Legende links oben) in etwa 5 500 m MSL sowie des horizontalen Windes (Windpfeile schwarz) auf Grundlage des RLMK-Modells (Prognosetermin 27.06.2013, 00 UTC). Wellenartige Strömungsmuster (auf- und abwärts gerichtete Vertikalwinde) sind vor allem im Nordosten Afghanistans ausgeprägt.

grad und die Erfassung im Vorhersagemodell speziell in der Konvektionsparametrisierung prüfen. Bei winterlichen Wetterlagen ermöglicht diese Kombinationsdarstellung zusätzlich eine Abschätzung von Auflösungstendenzen von Nebel- und Stratocumulus-Schichten durch den Beginn der modellinternen Einstrahlung beziehungsweise Konvektion.

### 4.3 Nutzung von RLMK- Modellparametern für Turbulenzvorhersagen

Bei hohen orthogonalen Windkomponenten kommt es über dem nahezu West-Ost-verlaufenden Hauptkamm des Hindukusch in Afghanistan zur Ausbildung von Rotoren und Gebirgswellen. Nach SINHA (1960) wurden dabei Vertikalgeschwindigkeiten bis 14 m/s beobachtet. Die korrespondierende Turbulenz führte in Afghanistan bereits zu mehreren Zwischenfällen und Einschränkungen im Flugverkehr AUSTIN et al (2013). Brechende Leewellen in Stratosphäre wurden im Zusammenhang mit dem Absturz eines Aufklärungsflugzeuges U-2 im Juni 2005 untersucht und beeinträchtigen das Einsatzspektrum von High Altitude Long Endurance UAS (HALE-UAS) wie zum Beispiel dem Waffensystem Global Hawk.

Um eine generalisierte Turbulenzvorhersage zu ermöglichen, werden RLMK-Felder des Parameters Vertikalwind für verschiedene Modellflächen zur Verfügung gestellt. Die Analyse der geordneten Vertikalbewegungsfelder in Kombination mit dem Modellparameter Turbulente Kinetische Energie (TKE) beziehungsweise der *Eddy Dissipation Rate* (EDR) erlaubt eine erste

Bewertung der für die Missionen der Waffensysteme zu erwartenden Turbulenzstärke (siehe Abb. 7-5).

### 4.4 Staubvorhersagen

Eine Staubausbreitungsvorhersage (Staubkonzentration und Sicht) für Afghanistan existierte für die Beratung durch das GeoInfo-Personal bisher nur von der U.S.-Air Force Weather Agency, die hierfür das WRF-Modell (*Weather Research & Forecasting*) mit einer zeitlichen Auflösung von 3 Stunden verwenden. Seit Anfang 2013 werden auch im RLM-Afghanistan des GeoInfoDBw Staubparameter berechnet und vorhergesagt. Die Vorhersagegüte im Vergleich zum WRF konnte über die Sommermonate erstmals verifiziert werden und wurde bislang als gut eingeschätzt. Abbildung 7-6 zeigt solch eine Staubvorhersage auf Grundlage des RLM II.

Die Vorhersagen bilden eine wertvolle Ergänzung, insbesondere bei der zeitlichen und räumlichen Prognose von Staubereignissen in Afghanistan, da Staubstürme oder Sichteinschränkungen durch Staub in Afghanistan recht häufig vorkommen. Im Winter sind sie oft an Kaltfronten gebunden, im Frühjahr zusätzlich als Staubwalze (Haboob, vergleiche Abb. 7-7) durch Downdrafts in der Nähe von Gewittern, im Spätfrühjahr oder Sommer treten sie in manchen Gebieten in Verbindung mit dem „Wind der 120 Tage“ (Afghanez) auf.

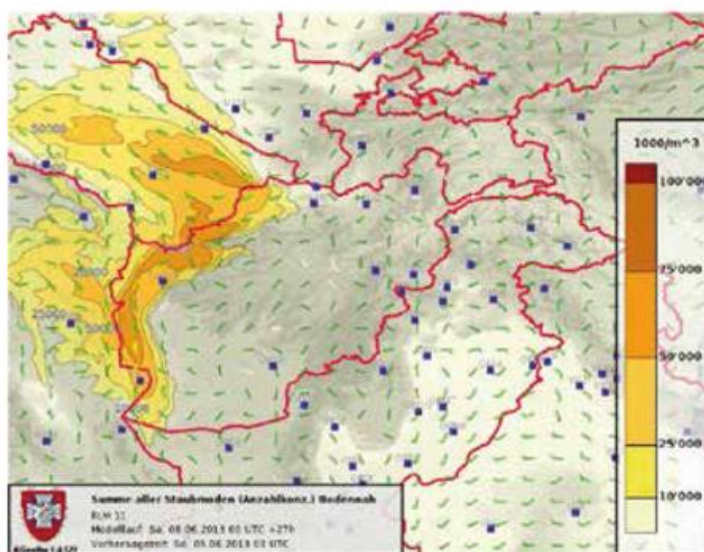


Abb. 7-6: Staubvorhersage (Summe der Anzahlkonzentration aller Staubpartikel) vom 9.06.2013 für 3 UTC auf Grundlage des RLM (Modellregion Afghanistan). Gegen 3 UTC erfolgte der Frontdurchgang in Mazar-e Sharif (OAMS), verbunden mit einer Windzunahme auf über 37 km/h und einem Sichtrückgang auf 1200 m. In Termez (UTST) wurden Sichten von 3 km beobachtet. Des Weiteren sind dargestellt der Bodenwind (grüne Windpfeile) und Flugplätze mit ICAO-Kennung (blau).



Abb. 7-7: Staubwalze im Feldlager Mazar-e Sharif mit aufkommender Sichttrübung < 100 m. Bildquelle: Bundeswehr.

#### 4.5 MOS-Entwicklung für Wetterbeobachtungsstationen in Einsatzgebieten

*Model Output Statistics* (MOS) ist ein statistisches Post-Processing-Verfahren und basiert auf linearen Regressionsgleichungen. Die erhaltenen Korrelationen beschreiben die bestmögliche Prediktor-Prediktand-Beziehung. Ziel des Anschlussverfahrens ist es, systematische Fehler aus dem *Direct Model Output* (DMO) mit Hilfe der Statistik beziehungsweise auf Grundlage der Beobachtungsdaten herauszufiltern. Eine Beschreibung des beim DWD operativ betriebenen Verfahrens ist bei WALTER et al (2010) zu finden.

Mit den ersten kontinuierlichen Wetterbeobachtungen der GeoInfo-Personal in Einsatzgebieten entstand die Forderung einer MOS-Entwicklung für die jeweiligen Flugplätze im Einsatzland. Zunächst waren für die Flugwetterberatung nur DMO-Vorhersagen der Parameter Temperatur, Bodenwind, Wettererscheinung und andere auf Grundlage des GME und später Interpolationsstationen auf der Basis MOSMIX (gewichtete Kombination von GME- und EZMW-MOS; siehe HAALMAN und KNÜPFER, 2003) vorhanden.

Flugplatzwettermeldungen standen zu Beginn nur im METAR-Format (FM-15) zur Verfügung, was eine MOS-Entwicklung schwierig gestaltete. Erst mit der zusätzlichen Erstellung von SYN-OP-Reports (FM-12) im Jahr 2012 und längeren stabilen Beobachtungszeiträumen konnte mit einer MOS-Neuentwicklung begonnen

werden. Die Empfehlung zusätzlich SYN-OP-Reports (stabiles IT-Format) zu erstellen, wurde auch der NATO gegeben. Es ist jedoch zu beachten, daß eine kontinuierliche Beobachtungsreihe der Stationen auf Grund der wechselnden Sicherheitslagen nicht immer möglich ist. Im Vergleich zum DWD ist die Bundeswehr hier gezwungen, Kompromisse einzugehen. Die Parametervorhersagen einer entwickelten *MOS-Guidance* stellen jedoch bei dem temporär wechselnden GeoInfo-Personal beziehungsweise den Wetterberatern mit unterschiedlicher Kenntnis lokaler Besonderheiten, einer relativ kurzen Einsatzzeit und dem notwendigen Planungszeithorizont für die Transportflüge von mehreren Tagen einen erheblichen Informationsgewinn dar.

Seit dem Frühjahr 2013 steht eine in Kooperation mit dem DWD entwickelte MOS-MIX-Station für Mazar-e Sharif und Kunduz testweise zur Verfügung (Tab. 7-1). In Fayzabad (etwa 1200 m NN) in der Provinz Badakhshan im Nordosten von Afghanistan wurde die ohnehin leider nicht kontinuierliche Beobachtungsreihe mit dem Abzug des *Provincial Reconstruction Team* (PRT) Ende 2012 beendet.

#### 5 Nutzung von MET-UAS zur meteorologischen Datengewinnung und Verwendung der Vertikalsondierungen in der numerischen Datenassimilation

Wie bereits in Kapitel 3 kurz aufgeführt, erwartet der Bedarfsträger in den Einsatzgebieten der Bundeswehr speziell für die taktische Beratung der Waffensysteme eine Prognose atmosphärenphysikalischer Parameter in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Aktuell ist nur das

| MOSMIX-Guidance | Di 25.06.2013 | 03.30z   | 40911       | OAMS        | MAZAR-I-SHARIF |
|-----------------|---------------|----------|-------------|-------------|----------------|
|                 | OBS           | Di 25    | Mi 26       | Do 27       | Fr 28          |
| PREDICTAND      | 03z           | 06 12 18 | 00 06 12 18 | 00 06 12 18 | 00 06 12 18    |
| T2m             | 32            | 39 42 36 | 33 38 41 36 | 33 36 38 33 | 30 34 36 33    |
| Td2m            | 3             | 2 1 2    | 4 4 2 2     | 4 6 6 7     | 7 8 6 8        |
| Tmax_12         | 41            | 43       | 42          | 39          | 37             |
| Tmin_12         | 35            |          | 29          | 29          | 27             |
| T5cm_Min_12     | 26            | 25       | 30          | 30          | 28             |
| DD              | 6             | 31 30 23 | 25 29 28 25 | 26 28 28 25 | 26 27 28 25    |
| FF7kt_0         | 4             | 8 7 8    | 9 12 12 15  | 17 19 15 15 | 15 18 15 12    |
| FX_X_12         | 17            | 18 16    | 23 25       | 32 30       | 31 28          |
| ww_Code         | 0             | 0 0 0    | 0 0 0 0     | 0 0 1 0     | 0 0 1 0        |
| W1W2_Code       | 00            | 00 00 00 | 00 00 00 00 | 00 10 20 10 | 00 00 10 10    |

Tab. 7-1: Entwickelte MOSMIX-Guidance mit einzelnen Prediktanden (unter anderem T2m -Lufttemperatur in 2 m Höhe, Td2m -Taupunkttemperatur in 2 m Höhe, DD-Windrichtung, FX\_X\_12-maximale Windspitzen in 12 Stunden) auf Grundlage kontinuierlicher Wetterbeobachtungen der GeoInfo-Beratungsstelle der Bundeswehr am Flugplatz Mazar-e Sharif (AFG).

RLMK ( $\Delta x \sim 2,8$  km) in der Lage, die verbesserte Vorhersageleistung speziell bei gefährlichen Wetterlagen (Multizellengewitter, Föhns und Staubstürmen, orographische Turbulenz, Sturmfluten) auf Grundlage der Modellphysik und -orographie zu erbringen. Durch das Fehlen von Wetterbeobachtungsdaten in den meist datenarmen Einsatzgebieten der Bundeswehr muss für das Lokalmodell des GeoInfoDBw eine hinreichende Versorgung mit Daten zur Berechnung des RLMK-Anfangszustandes erfolgen. Die Datenversorgung auf Grundlage der wenigen aerologischen Aufstiege ist hierfür nicht ausreichend, logistisch sehr aufwendig beziehungsweise kostenintensiv und zudem nicht flexibel. Bei den US-Streitkräften erfolgt aus diesem Grund zunehmend eine Bereitstellung von MET-Daten aus den Einsatzländern mit Hilfe von *Unmanned Aircraft Systems*. Aktuell existieren bereits erste Erfahrungen mit MET-UAS-Messungen im Zusammenhang mit der Vulkanasche- sowie in der Schadstoffausbreitung. Der Global Hawk wurde bereits mit umfangreicher Sensorik (zum Beispiel *High-Altitude Imaging Wind and Rain Airborne Profiler*) genutzt, um mit einer Flugdauer von über 30 Stunden über den Zentren von Wirbelstürmen zu fliegen. Nach HEYMSFIELD et al (2008) eignen sich diese multifrequenten Messungen, um 3D-Felder atmosphärischer Höhenwinde und Niederschlagsfelder zu erstellen. Verbesserungen bei der Bestimmung des Höhenwindes in der Stratosphäre werden von neuen stratosphärischen Höhenplattformen mit Solarantrieb mit hoher Verweildauer erwartet. Die Nutzung dieser Messdaten für die Datenassimilation könnte ebenfalls über das AMDAR-Format erfolgen.

Vergleichssondierungen mit aerologischen Aufstiegen in der atmosphärischen Grenzschicht demonstrierten eine bessere Erfassung relevanter Strukturen (Inversionshöhe; Windscherungen, *Low Level Jets*). Emissionen beziehungsweise Ausbreitungen werden in der atmosphärenphysikalischen 3D-Struktur von Systemen der Bundeswehr bis dato kaum erfasst. Diese Fähigkeitslücken gilt es mit modernen MET-UAS zu schließen. Eine unmittelbare Verwendung in einem RLM/RLMK-Datenassimilationsverfahren lässt eine Erhöhung der Prognosegüte und Erfassung mesoskaliger Effekte erwarten.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde dargestellt, welche Herausforderungen die Einsatzkräfte des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr bei der Flugwetterberatung und Wetterbeobachtung im Einsatz in Afghanistan zu bewältigen haben.

Optimierungsbedarf besteht vor allem im Bereich der Vorhersageverfahren und -methoden für die unbemannten Luftfahrzeuge. Besonders bei winterlichen Wetterlagen hat sich gezeigt, dass die Effekte zwar ähnlich wie in Deutschland sind, spezielle klimatische und geografische Bedingungen des Einsatzlandes jedoch nicht oder nur zu

ungenau erfasst und berücksichtigt werden. Die Schwierigkeiten bei der Niederschlags- und Staubprognose wurden beschrieben und diskutiert.

Die Anpassung von Anschlussverfahren wie ADWICE, Konvektionsvorhersagen oder MOS an die numerischen Modelloutputs müssen von Beginn an für das jeweilige Einsatzgebiet erfolgen. Um eine hinreichende Versorgung mit Daten zur Berechnung des RLMK-Anfangszustandes zu gewährleisten, stellt der Einsatz von MET-UAS ein geeignetes Mittel dar. Diese Entwicklung gilt es weiter voranzutreiben.

Die Zusammenarbeit des GeoInfoDBw mit dem DWD hat sich insbesondere in der numerischen Wettervorhersage und den meteorologischen Anschlussverfahren hervorragend für die Einsatzunterstützung bewährt und sollte in Zukunft zur Nutzung weiterer Synergieeffekte intensiviert werden.

## Literatur

- AUSTIN, E., GOATES, S.N., WILLIAMS, P.B., TEETS, E.H., 2013: The Use of the MM5 and WRF Models to Solve Problems: From Forecasting to Forensics, 93rd *American Meteorological Society Annual Meeting*.
- DANIEL, D., WEBER-BLONSKY, M., SCHENK, J., ABSCHLAG, D., HÜLLER, J., 2011: Wetterbeobachtung und Wetterberatung im ISAF-Einsatz in Afghanistan. *GeoInfoForum-Mitteilungen des Geoinformationsdienstes der Bundeswehr* 2, 3-9.
- HEYMSFIELD, G., CARSWELL, J., LIHUA LI, L., SCHAUBERT, D., CRETICOS, J., VEGA, M., WELCH, W., 2008: Status of the High-Altitude Imaging Wind and Rain Airborne Profiler (HIWRAP). *ESTC2008, Earth Science Technology Conference 2008, June 24-26, 2008, USA*.
- HAALMAN, D., KNÜPFER, K., 2003: MOS-MIX: Integrated Statistical Interpretation of Multiple Numerical Models. *European Conference on Applications of Meteorology*, ECAM.
- LÖFFLER, H., 2011: Afghanistan – einmal nur aus meteorologischer Sicht. *DMG Mitteilungen* 1/2011.
- PRENOSIL, T., AMTMANN, R., DERICHS, H., 2000: The global relocatable regional weather prediction model of the German Military Geophysical Office. *Meteorological Applications* 6, 159-171.
- SINHA, M.C., 1960: Upper-Air Standing Waves over Kabul Valley. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre* 32, 215-236.
- WALTER, A., TREPTE, S., THEHOS, R., 2010: Statistische Vorhersage- und Warnverfahren: MOS-MIX, WarnMOS, BlitzMOS und CellMOS. *Promet* 35, 1-3, 70-77.
- WRF, 2013: v2 Software Tools and Documentation, [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/WG2/software\\_2.0/](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/WG2/software_2.0/), aufgerufen am: 13.06.2013.

K. SIEVERS

# 8 Wetterinformationen für Piloten: ein Erfahrungsbericht aus der Praxis

Weather information for pilots: a look at the real world

## Zusammenfassung

Wetter – wozu Wetterinformationen, wo doch alle Flugzeuge automatische Landungen machen können, über Bordradar verfügen und auch gegen Vereisung geschützt sind? Die Frage ist berechtigt – theoretisch. Denn lange nicht alle Flugzeuge sind wie beschrieben ausgestattet und es gilt auch heute noch, wie zu Zeiten Lilienthals und Lindberghs, dass die Kräfte der Natur stärker als alle von Menschenhand erschaffenen Maschinen sind. Piloten wissen das und vergewissern sich vor und während jedes Fluges, dass das Wetter eine sichere Flugdurchführung erlaubt. Dies ist eine Beschreibung der heutigen Praxis in der professionellen Fliegerei in Deutschland.

## Abstract

Weather – why is weather information important, although all aircraft can do automatic landings, have their own radar and are protected against icing? The question is a theoretical one. Not all aircraft are equipped as described. More importantly, as in the days of Lilienthal and Lindbergh, the forces of nature can overwhelm all machines built by us humans. Pilots know that and ascertain before and during each flight that weather will allow it to be a safe one. This article describes operational practice in Germany.

## 1 Einführung

Wetterinformationen werden zunächst zur Flugvorbereitung benötigt und müssen somit an dem Ort zur Verfügung stehen, an dem die Flugplaner (*dispatch*) und die Piloten arbeiten. Dies geschieht über Computer- und Briefingsysteme wie das pc-met des Deutschen Wetterdienstes (DWD) oder kommerzielle Anbieter, wie zum Beispiel Jeppesen oder Lido. Die Wetterinformationen werden für die Piloten ausgedruckt und ihnen meist auch in elektronischer Form zur Verfügung gestellt, wenn dies technisch möglich ist. Ein früher häufiger Besuch der Wetterberatung am Flughafen findet fast gar nicht mehr statt; eine individuelle Beratung von Verkehrspiloten zur Meteorologie eines Fluges gibt es kaum noch. Damals wie heute liegt es jedoch in der Verantwortung der Piloten, sich ausreichend mit Wetterinformationen zu versorgen. Der einschlägige Paragraph der Luftverkehrsordnung drückt es so aus:

### § 3a Flugvorbereitung

(1) Bei der Vorbereitung des Fluges hat der Luftfahrzeugführer sich mit allen Unterlagen und Informationen, die für die sichere Durchführung des Fluges von Bedeutung sind, vertraut zu machen und sich davon zu überzeugen,

*dass das Luftfahrzeug und die Ladung sich in verkehrssicherem Zustand befinden, die zulässige Flugmasse nicht überschritten wird, die vorgeschriebenen Ausweise vorhanden sind und die erforderlichen Angaben über den Flug im Bordbuch, soweit es zu führen ist, eingetragen werden.*

(2) Für einen Flug, der über die Umgebung des Startflugplatzes hinausführt (Überlandflug), und vor einem Flug nach Instrumentenflugregeln hat sich der Luftfahrzeugführer über die verfügbaren Flugwettermeldungen und -vorhersagen ausreichend zu unterrichten. Vor einem Flug, für den ein Flugplan zu übermitteln ist, ist eine Flugberatung bei einer Flugberatungsstelle einzuholen. Absatz 1 bleibt unberührt.

(3) Ein Flug führt über die Umgebung eines Flugplatzes hinaus, wenn der Luftfahrzeugführer den Verkehr in der Platzrunde nicht mehr beobachten kann.

Erkennt ein Pilot, dass über den Rahmen des Briefingpakets hinausgehende Informationen benötigt werden, so hat er sich diese bei dem für den Startflughafen zuständigen Wetterdienst zu besorgen, gegebenenfalls auch durch eine persönliche Beratung oder online. Soweit die Theorie - in



Abb. 8-1: Typische Bestandteile eines Briefingpaketes (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Lufthansa Systems, Lido/Flight).

der Praxis des Linienflugbetriebes und der professionellen Luftfahrt ergeben sich dann je nach Flug Briefing-Pakete unterschiedlicher Art. Ein normales Briefing-Paket eines Fluges (Langstrecke) zeigt beispielhaft Abb. 8-1.

Briefing-Pakete beinhalten bei Kurzstreckenflügen vielleicht 20 Seiten, in diesem Beispiel eines Langstreckenfluges sind es allerdings 50 Seiten (siehe Abb. 8-1):

- Flugplan mit Zeit-, Treibstoff- und Streckeninformationen (9 Seiten),
- SIGMETs, Tropical Storm-, Volcanic Ash-Meldungen (3 Seiten),
- Informationen der Flugsicherung (NOTAM, Atlantic tracks) (24 Seiten),
- Signifikante Wetterkarten, Niederschlagskarten, Flugprofil (14 Seiten).

Eine Besatzung eines Verkehrsflughafens, egal ob Kurz- oder Langstrecke, unterliegt gesetzlichen Dienstzeitregelungen. Diese Dienstzeitregelungen oder auch die Bodenzeiten zwischen zwei Flügen bedingen, dass kaum mehr als 15 Minuten Zeit bleibt, diese Informationsfülle des gesamten Briefings-Paketes zu sichten, zu bewerten und dann zu entscheiden. Es gilt, den Flugplan auf Plausibilität zu prüfen und angesichts der vorliegenden Informationen zu entscheiden, ob geflogen werden kann, ob Änderungen nötig sind (selten) und wie viel Treibstoff getankt werden soll. Das unter den gegebenen Umständen mögliche Start- oder Landegewicht ist dabei eine wichtige Randbedingung. Aus dem Bereich Technik kann es unter Umständen Einschränkungen geben, wie beispielsweise die mögliche Mindestsicht für Anflüge. Auch dies gilt es zu beachten.

Gerade unter dem Zeitaspekt gilt es, auch die Wetterinformationen zu betrachten. Offensichtlich muss das Wetter für Luftfahrer schnell erfassbar präsentiert werden und die wichtigen Informationen zuverlässig enthalten, sonst wird es den Anforderungen nicht gerecht. In kurzer Zeit muss der Gesamtzustand des Luftraumes vermittelt werden und die wirklich wichtigen Details des konkreten Fluges sollten

klar und deutlich zutage treten. Die vormals erwähnten 15 Minuten stehen nicht exklusiv für ein Wetter-Briefing zur Verfügung - zwei, drei Minuten Zeit entsprechen schon einer gründlichen Beschäftigung mit dem Wetter. Bei schwierigen Wetterentscheidungen wird sich allerdings wohl jede Besatzung die Zeit nehmen, die für eine fundierte Entscheidung nötig ist, denn Sicherheit geht vor.

Die wesentlichen Bestandteile des Wetterteiles eines Briefing-Paketes sind:

- Aktuelle Wettermeldung (METAR) und Vorhersage (TAF) für Zielort und Ausweichflugplätze,
- Wetterkarten zu signifikantem Wetter (SigWx), Flughöhen und
- Wetterkarten zu Höhenwinden sowie Temperatur.

Ergänzungen hierzu sind üblich und auch aus diversen Quellen leicht erhältlich. Beispiele hierzu sind etwa Radarbilder, Satellitenbilder, Vereisungsvorhersagekarten, Analysekarten, Turbulenzvorhersagekarten, GAFOR-Berichte, Blitzkarten, Temp-Grafiken, Karten von tropischen Stürmen, Vulkanaschekarten oder auch Sonnenwetterinformationen. Im Folgenden werde ich anhand von Beispielen aus Briefing-Paketen aufzeigen, welcher Art die Wetterinformationen sind, die die Nutzer, die Piloten erhalten.

## 2 Wetterinformationen für innerdeutsche Flüge

### Departure airport EDDB - SXF - BERLIN/SCHOENEFELD RWY 07L 25R

SA 131820Z 06003KT 9999 -SN SCT012 BKN018 M03/M05 Q1020 R07/29//95 NOSIG=

FT 131700Z 1318/1418 08007KT 9999 BKN020 TEMPO 1318/1402 4000 -SN BKN012 BECMG 1409/1412

4000 -SN BKN012 TEMPO 1412/1418 1000 SN BKN003=

### Destination airport EDDF - FRA - FRANKFURT/MAIN RWY 07C 07L 07R 18 25C 25L 25R 36

SA 131820Z 06009KT 9999 SCT040 M03/M08 Q1015 NOSIG=

FT 131700Z 1318/1424 03007KT 9999 SCT045 BECMG 1400/1403 BKN045 BECMG 1410/1413 32005KT

BECMG 1418/1421 FEW045 BECMG 1420/1423 VRB03KT=

### Alternate airport EDFH - HHN - FRANKFURT-HAHN RWY 03 21

SA 131820Z 06004KT CAVOK M07/M09 Q1013=

FT 131700Z 1318/1418 07008KT 9999 BKN025 TEMPO 1400/1411 BKN010 BECMG 1404/1407 01004KT=

### Adequate airport EDDT - TXL - BERLIN/TEGEL RWY 08L 08R 26L 26R

SA 131820Z 06006KT 9999 -SN FEW012 SCT016 BKN023 M03/M05 Q1020 R88/190095 NOSIG=

FT 131700Z 1318/1418 08007KT 9999 BKN020 TEMPO 1318/1402 4000 -SN BKN012 BECMG 1409/1412

4000 -SN BKN012 TEMPO 1412/1418 1000 SN BKN003= Adequate airport EDBC - CSO - MAGDEBURG/COCHS-TEDT RWY 08 26

SA 131650Z 08005KT 9999 BKN022 M04/M07 Q1018=  
 FC 131700Z 1318/1403 07006KT 9999 SCT020 BKN035=  
**Adequate airport EDDE - ERF - ERFURT/WEIMAR  
 RWY 10 28**  
 SA 131820Z 08010KT 9999 OVC026 M04/M07 Q1016  
 R88/520595 NOSIG=  
 FT 131700Z 1318/1418 07006KT 7000 SCT015 SCT030  
 PROB40 TEMPO 1318/1410 2500 BR BKN004  
 BKN007 BECMG 1407/1409 36005KT=  
**Adequate airport EDVK - KSF - KASSEL/CALDEN  
 RWY 04 22**  
 SA 131720Z 03004KT 5000 -SN BR SCT007 BKN013  
 M03/M04 Q1016=  
 FC 131100Z 1312/1321 04005KT 9000 SCT013 BKN020  
 PROB30 TEMPO 1312/1321 4500 -SN BKN013=  
**No SIGMETs found**

Diese Liste enthält neben den reinen Wettermeldungen in den Überschriften noch Zusatzinformationen in Form der jeweils vorhandenen Landebahnen auf den Flughäfen. Die Wetterinformationen selbst werden in kodierter Form aufgeführt; diese entspricht den Regeln der WMO sowie insbesondere der ICAO ANNEX 3, *Meteorological Services for International Air Navigation*. In den Buchstaben und Zahlen ist das aktuelle Wetter in den Zeilen beginnend mit SA, die Vorhersage wiederum in den Zeilen beginnend mit FC aufgeführt.

Piloten haben die Ausbildung, diese Meldungen zu verstehen und sich so ein Bild vom Wetter an einem Flughafen zu machen. Es gilt, Aufschluss über die Nutzbarkeit eines Flugplatzes beziehungsweise eines oder mehrerer Anflugverfahren zu bekommen. Wegen der Informationsdichte, der Zahlen und Abkürzungen, ist jedoch eine hohe Aufmerksamkeit nötig, hier keine Details zu übersehen, auch und gerade während der Flugvorbereitung, die meist und wie gesagt unter einem gewissen Zeitdruck stattfindet.

Aus der Gesamtschau aller Meldungen eines Gebietes kann man mit viel Mühe das Wettergeschehen in einer Region erfassen, sehen, wie beispielsweise eine Schneefront ziehen wird. Leichter erledigt man dies mittels Wetterkarten. Diese Vorhersagekarte (siehe Abb. 8-2) zeigt beispielsweise die Lage von Hoch- und Tiefdruckgebieten, Fronten, Niederschlagsart und mehr.

Eine Kartenart ist die Sig-WX-Chart, die signifikante Wetterkarte. Abb. 8-3 zeigt ein Beispiel. Neben der Flugstrecke zeigt diese Karte Lufträume mit wichtigen Wetterphänomenen:

- (1) *severe* (starke) Turbulenz sowie Vereisung vom Boden bis FL 150 (15 000 Fuß Höhe),
- (2) isolierte, in Wolken eingebundene Gewitter vom Boden bis FL 280,
- (3) *severe* (starke) Turbulenz sowie Vereisung vom Boden bis FL 130,
- [1] *severe* (starke) clear air turbulence zwischen FL 220 und FL 370,
- [2] *severe* (starke) clear air turbulence zwischen FL 270 und FL 380.



Abb. 8-2: Bodenwetterkarte mit Fronten, Niederschlägen etc. (reproduced with permission of Jeppesen Sanderson, Inc., not for navigational use).



Abb. 8-3: Sig-WX-Chart für Mitteleuropa (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Airsupport A/S, Dänemark).

Zudem ist noch ein Windpfeil eingezeichnet, der aus Osten kommend über Schleswig-Holstein hinweg zeigt. Dies ist ein Strahlstrom, ein Jetstream, dessen stärkster Wind in FL 300 erwartet wird und dessen Windgeschwindigkeit mit 80 Knoten angegeben ist.

Sig-WX-Charts werden in der Praxis meist in Schwarz-Weiß gedruckt, in Farbe gibt es sie nur auf Computerbildschirmen oder in *electronic flight bags* zu bewundern. Durch den Ausdruck in Schwarz-Weiß sind die in den Karten enthaltenen Informationen weniger gut zu erfassen, doch sind die Besatzungen darin ausgebildet, gerade auch solche Karten sicher zu nutzen, wozu dann im Einzelfall ein erhöhter Zeitaufwand von Nöten sein kann.

Abb. 8-4 zeigt eine Vorhersagekarte der Winde und Temperatur in FL 300. Ähnlich wie in der Sig-WX-Karte wird die Windgeschwindigkeit durch die Fähnchen dargestellt. Die Temperaturangaben tragen kein Vorzeichen, bedeuten jedoch Minusgrade. Die Legende zeigt den Gültigkeitszeitpunkt für diese Karte: 19 Uhr UTC (koordinierte Weltzeit), 13 Jan 2013. Die Karte wird aus digitalen Daten erstellt und ist für eine Anzahl von Flughöhen und Vorhersagezeitpunkten erhältlich. Aus eingezeichnetem Flugweg und den Windinformationen wird den Piloten ein Eindruck vom Strömungsfeld gegeben, durch das er fliegen wird. Der Flugplan wurde aufgrund der digitalen Daten vom Computer op-

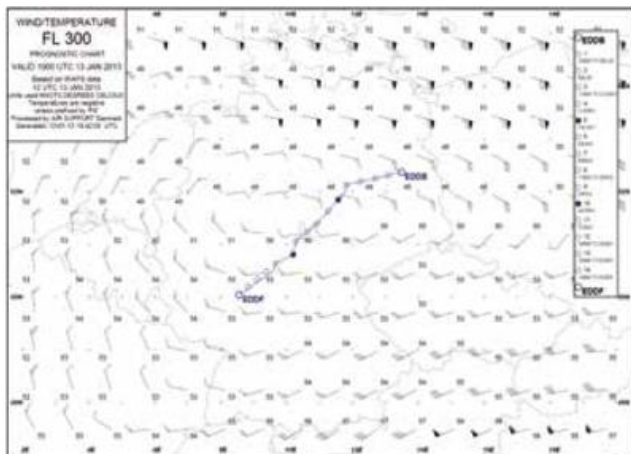


Abb. 8-4: Wind- und Temperaturvorhersagekarte für FL 300 (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Airsupport A/S, Dänemark).



Abb. 8-5: Beispiel für eine Turbulenzkarte der Fa. Jeppesen (reproduced with permission of Jeppesen Sanderson, Inc., not for navigational use).

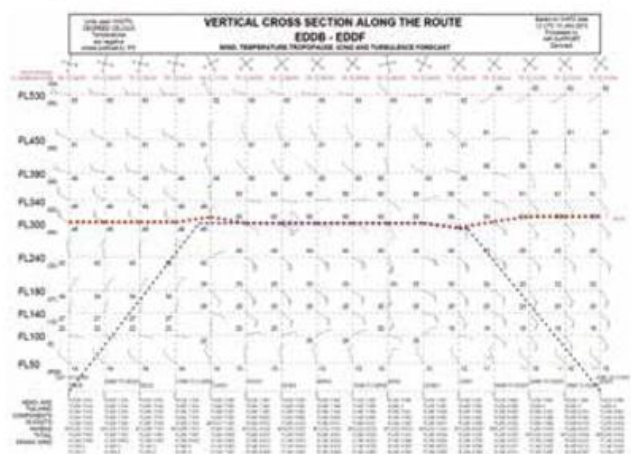


Abb. 8-6: Profil eines Flugweges (Vertikalschnitt) (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Airsupport A/S, Dänemark).

timiert und erstellt – allein, die dabei genutzten Informationen müssen dem Piloten verständlich dargestellt werden, damit er im Flug anstehende Entscheidungen zu treffen vermag. Dies kann beispielsweise die Wahl einer anderen Flughöhe sein, falls die geplante, optimierte Höhe nicht verfügbar ist. Dann geht es darum, ob es sinnvoller ist, eine größere oder eine geringere Höhe als die geplante zu fliegen. Eine Seitenansicht, ein Profil des Fluges, hilft hier ebenfalls. Diese wird

individuell für jeden Flug von kommerziellen Anbietern erstellt. Dabei gibt es dann durchaus Unterschiede; ein Anbieter mag die Winde so zeigen, wie sie in der Höhenwindkarte gezeigt werden, ein anderer zeigt vielleicht die Gegenwind- oder Rückenwindkomponente.

Die Turbulenzvorhersage, eine Spezialkarte, ist nicht Bestandteil des regulären Briefing-Paketes, wird aber von Firmen wie Jeppesen, WSI und anderen erstellt. Ein Beispiel zeigt Abb. 8-5. Die Vorhersagegenauigkeit solcher Karten ist erfahrungsgemäß gut, soweit es um die stärksten Turbulenzstufen geht

In Abb. 8-6 ist im Profilschnitt der Flugweg in der Vertikalen eingezeichnet. Man sieht ebenfalls die Winde in den verschiedenen Höhen, wobei sie allerdings in der Orientierung variieren. Sie wurden an die Flugrichtung in den einzelnen Flugabschnitten angepasst, wie an den kleinen N-S- und E-W-Achsenkreuzen im oberen Teil des Graphen zu erkennen ist. Hier fliegt das Flugzeug von links nach rechts; ein Windpfeil, der nach links zeigt, bedeutet also Gegenwind. In diesem Fall zeigt sich, dass durch den Steigflug auf FL 300 den stärkeren Gegenwinden in FL 300 ausgewichen werden kann. So wird es möglich, aufgrund guter Wetterinformationen, Zeit und Kosten zu sparen sowie die Umwelt zu schonen.

### 3 Wetterinformationen für internationale Langstreckenflüge

Die nächsten Seiten entstammen einem Flugplanpaket eines Langstreckenfluges von Mexiko City nach Frankfurt. Schon bei Durchsicht der SIGMETs zeigt sich, dass dieser Flug nicht ganz unproblematisch ist:

LIDO/WEATHER SERVICE DATE : 15Dec2012 TIME : 00:26 UTC

- AIRMETS: No Wx data available**
- SIGMETs: No Wx data available**
- Canadian Domestic SIGMETs: No Wx data available**
- US Convective SIGMETs: No Wx data available**
- Tropical Cyclone SIGMETs: No Wx data available**

Volcanic Ash Advisories:  
**MMFR MEXICO FIR**  
 VA ADVISORY -CORRECTION  
 DTG: 20121214/2324Z  
 VAAC: WASHINGTON  
 VOLCANO: POPOCATEPETL 1401-09  
 PSN: N1901 W09837  
 AREA: MEXICO  
 SUMMIT ELEV: 17802 FT (5426 M)  
 ADVISORY NR: 2012/295  
 INFO SOURCE: MEXICO CITY MWO GOES-13  
 GPS WINDS PILOT REPORT  
 ERUPTION DETAILS: ERUPTION PRIOR TO 14/2215Z  
 OBS VA DTG: 14/2245Z  
 OBS VA CLD: SFC/FL240 N1928 W09822 - N1922 W09812 - N1900 W09834 - N1905 W09838 - N1928 W09822 MOV NE 20-25KT  
 FCST VA CLD + 6 HR: 15/0500Z SFC/FL240 NO ASH EXP FCST VA CLD  
 HR:+12HR: 15/1100Z NO ASH EXP  
 FCST VA CLD + 18 HR: 15/1700Z NO ASH EXP  
 RMK: CORRECTED FOR FLIGHT LEVEL.....SLTL IMAGERY SHOWS A PAINT VA PLUME 20 NM WIDE EXTD 25 NM NE OF THE SUMMIT  
 MEXICO CITY MWO CONFIRMS VA EMISSION  
 VA HAS ALREADY BEGUN TO DISP  
 ...GUILLOT  
 NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20121215/0530Z

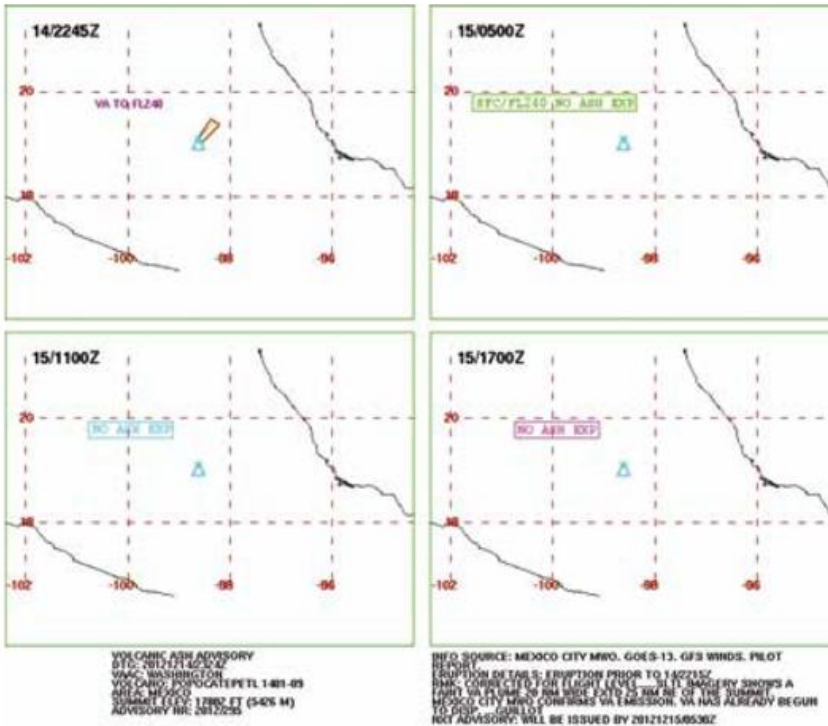


Abb. 8-7: Graphical ash advisory chart des VAAC Washington.

**Volcanic Ash SIGMETs: No Wx data available**  
**Tropical Cyclone Advisories: No Wx data available**

Das Problem ist ein Ausbruch des Vulkans Popocatepetl, der ja nur 65 Kilometer (35 nautische Meilen) vom Flughafen Mexico City entfernt ist. Die Aschewolke wurde zwischen dem Erdboden und FL 240 beobachtet; ihre Ausmaße wurden durch die Koordinaten beschrieben. Es liegt nur ein *ash advisory* vor; ein *volcanic ash sigmet* wurde nicht herausgegeben. Aufgrund fehlender Angaben ist die Aschekonzentration im gesamten Gebiet als hoch anzunehmen; ein Durchflug darf nicht geplant werden. Von Bedeutung ist nun die nach den Koordinaten folgende Information: MOV NE 20-25KT. Die Wolke bewegt sich Richtung Nordost, mit 20 bis 25 Knoten.

Wichtig auch die Einschätzung des VAAC (*Volcanic Ash Advisory Center*): „VA has already begun to disp“, also etwa „Vulkanasche hat begonnen, sich zu verteilen/dünnen zu werden“. Der Ausbruch des Popocatepetl ist also schon vorüber und war auch nicht sehr groß.

Zur Visualisierung dient die graphische Darstellung des *ash advisories*, wie Abb. 8-7 zeigt. Ein Blick auf die Navigationskarte zeigt, dass der Flugplatz von Mexico City etwa bei 19 Grad, 25 Minuten Nord und 99 Grad West liegt. Bezogen auf die Graphik wäre das in etwa an der Stelle, an der im oberen, linken Quadrat „FL 240“ steht. Aufgrund der Information aus dem *ash advisory*, dass die Wolke Richtung Nordost treibt, ist also ein Abflug aus Mexico City möglich.

|                 |                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| CALCO           | VXV             | BKW             | JASEN           |
| N3420.7         | N3554.3         | N3746.8         | N3903.6         |
| W08601.2        | W08353.7        | W08107.4        | W07752.1        |
| 370 274/101 -56 | 370 278/109 -57 | 370 282/115 -58 | 370 291/124 -59 |
| 350 275/096 -51 | 350 278/101 -52 | 350 280/104 -53 | 350 288/115 -55 |
| 330 273/089 -46 | 330 276/093 -47 | 330 278/095 -49 | 330 287/105 -50 |

Abb. 8-8: Wind- und Temperaturangaben an einzelnen Wegpunkten (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Lufthansa Systems, Lido/Flight).

Bei den Wettermeldungen fällt der Blick auf das aktuelle Wetter für den Bestimmungslughafen:

Destination: EDDF/FRA FRANKFURT/MAIN  
SA 150020 18012KT 9999 -RA FEW004 SCT007 BKN035 07/07 Q0998 R88/2///95 TEMPO RA BKN008=

SA: Aktuelles Wetter, 15. des Monats, 00:20 Uhr UTC. Wind aus 180 Grad (rechtsweisend, Bezug: geogr. Nordpol), mit 12 Knoten. Sicht mehr als 10 Kilometer, leichter Regen. Wenige Wolken in 400 Fuß, *scattered* (vereinzelt) in 700 Fuß, *broken* in 3500 Fuß, Temperatur 7 Grad C, Taupunkt 7 Grad C, Luftdruck (QNH) 998 hPa, temporär starker Regen und *broken* in 800 Fuß. Die Gruppe „R88/2///95“ gibt den Zustand der Landebahnen in Frankfurt wieder: R88 = alle Bahnen; 2 = Bahnen sind nass; keine Angabe für Bedeckungsgrad der Bahn, keine Angabe für Tiefe der Wasserschicht, 95 = Bremswirkung ist gut.

Für den Streckenflug gibt es neben den verschiedenen Karten noch eine Liste einer Auswahl von Wegpunkten, bei denen dann Temperatur und Winde in verschiedenen Höhen angegeben sind (siehe Abb. 8-8). Hier zu sehen ist der Name des Wegpunktes, seine geographischen Koordinaten und die Wetterinformation, dies sind die Winde und Temperaturen in verschiedenen Höhen. Piloten nutzen diese Liste als eines von mehreren Kriterien bei der Auswahl der jeweils günstigsten Flughöhe.

Die Sig-WX-Karte (Abb. 8-9) des Tages zeigte einige starke Strahlströme über dem Nordatlantik. Im Kästchen „CAT Areas“ ist nachzulesen, dass starke und extrem starke Turbulenz vorhergesagt wurde. Diese erscheint in Anbetracht der hohen Windgeschwindigkeit wahrscheinlich zu sein; an einigen Stellen werden 150 Knoten prognostiziert. Manchmal sind zusätzlich noch Striche angebracht, von denen jeder 10 Knoten Windgeschwindigkeit entspricht. Die Flugplanung erfolgte in etwa entlang der Winde über dem Atlantik; es gab lediglich leichte Turbulenz.

Während solcher Wetterlagen wird die Funkfrequenz gerne zum Austausch von Informationen zwischen den Flugzeugen genutzt; meldet etwa das 10 bis 15 Minuten voraus

fliegende Flugzeug an einer Position Turbulenz, so wird man vermutlich ebenfalls betroffen sein.

Hier das Beispiel einer Sig-WX-Karte des Nordatlantiks von einem anderen Datum, siehe Abb. 8-10. Die parallel verlaufenden Linien stellen die sich täglich ändernden



Abb. 8-9: Sig-Wx-Chart für ICAO Area H (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Lufthansa Systems, Lido/Flight).

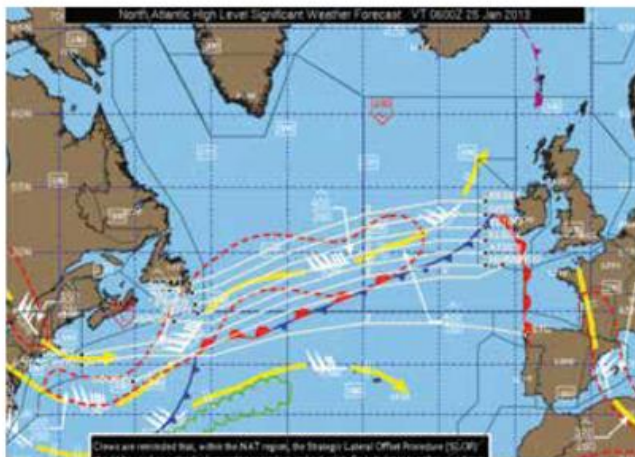


Abb. 8-10: Farbige Sig-Wx-Chart der Fa. Jeppesen, mit NAT-Tracks (reproduced with permission of Jeppesen Sanderson, Inc., not for navigational use).



Abb. 8-11: Sig-Wx-Chart für Europa, FL 100 bis FL 450 (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Lufthansa Systems, Lido/Flight).

Flugwege über den Nordatlantik dar, die *north atlantic tracks*. Anhand einer solchen Karte ist es Piloten besser möglich, das zu erwartende Streckenwetter einzuschätzen, weil die Relation des Flugweges zum Wetter leicht sichtbar ist.

Auch sonst werden in dieser farbigen Kartendarstellung die entscheidenden Wetterphänomene klarer und schneller erfassbar als in der schwarzweißen Sig-WX-Chart dargestellt. Die meisten Praktiker geben aus diesen Gründen einer farbigen Karte den Vorzug.

Hier nun der letzte Flugabschnitt, dargestellt auf der Sig-WX-Chart für Mitteleuropa, die zwar Land und Meer unterschiedlich eingefärbt zeigt, aber die Wettererscheinungen leider nur in Schwarz-Weiß wiedergibt (Abb. 8-11).

Man sieht auch hier starke Winde, sowie doch recht hoch reichende Wolkenfelder über England. Turbulenzwarnungen sind über der Biskaya und Frankreich sowie der Küste Ägyptens eingezeichnet. Beachtenswert ist auch der Ätna, der zwar aktiv ist, aber keine Aschewolke ausstößt, die in der Karte, die ja für höhere Luftschichten gemacht wird, einzuzichnen wäre.

Das Profil des Fluges ist ebenfalls interessant (Abb. 8-12). Die jeweils maximale Höhe, die erreicht werden kann, ist hier als schräg nach oben verlaufende Linie eingezeichnet. Darunter befindet sich die tatsächlich geplante Höhe, dargestellt als Linie mit Stufen, die entsprechend der aktuell günstigsten Höhe gewählt wird. Flugzeuggewicht und Leistungsdaten gehen ebenso in die Berechnung ein wie Höhenwinde und Temperatur. Unregelmäßig von oben links nach rechts abfallend dargestellt ist die Tropopause, bei deren Durchquerung erfahrungsgemäß mit leichter Turbulenz zu rechnen ist. Winde sind in dieser Graphik nicht dargestellt, sondern nur die Komponente des Windes in Flugrichtung - in diesem Fall einen starken Westwind in allen Höhen, doch bei genauerer Betrachtung zeigt sich ein Maximum zwischen FL 300 und 380, je nach Position. Die Temperaturen an den einzelnen Wegpunkten und in den einzelnen Höhen sind alle negativ, wie bei den anderen Darstellungen auch.

Den Abschluss dieser Zusammenstellung einer Übersicht über Wetterinformationen für Piloten bilden eine Niederschlagsprognosekarte (Abb. 8-13) und ein Satellitenbild (Abb. 8-14).

Diese Darstellung zeigt Hoch- und Tiefdruckgebiete, einige Isobaren sowie die Fronten und die prognostizierte Niederschlagsmenge. Es ist durchaus nicht einfach, aus einer Textliste von aktuellen Wettermeldungen und Vorhersagen ein Bild des Wetters in einigen tausend Kilometern Entfernung zu gewinnen. Da ist diese Karte recht hilfreich, weil eben eine graphische Aufbereitung der Informationen leichter auszuwerten ist. Sie gibt

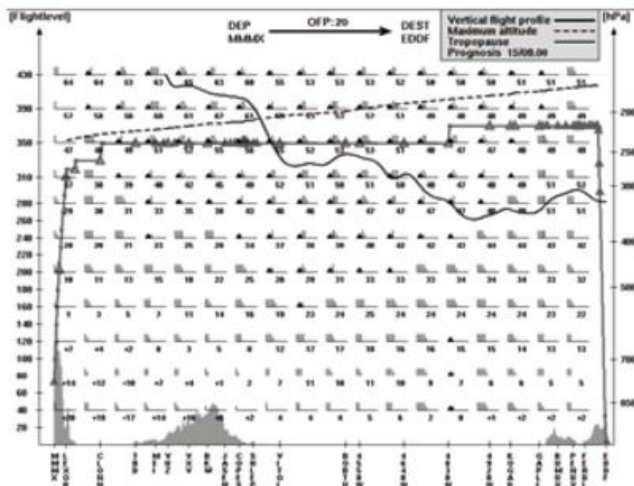


Abb. 8-12: Profil eines Langstreckenfluges (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Lufthansa Systems, Lido/Flight).

einen guten Eindruck von der Regen- beziehungsweise Schneemenge, die vorhergesagt wird, und auch die Fronten helfen bei der Einschätzung der Wetterlage. Wie bei vielen Karten gilt auch hier, dass die farbige Version deutliche ergonomische Vorteile gegenüber einer schwarzweißen Version dieser Karte bietet.

Auf keinem Flug sollte ein Satellitenbild fehlen, weil es einen Gewinn an Information und Übersicht und damit Sicherheit bietet (Abb. 8-14). Auf diesem Satellitenbild lässt sich eine stärkere Strömung über dem Atlantik erahnen. Was aber ganz deutlich herausgestellt wird, ist die Temperatur der höchsten Wolkenschicht. Ein einfacher Vergleich mit der Temperatur, die an den einzelnen Wegpunkten der Flugplanung vermerkt ist, erlaubt einen Rückschluss darauf, ob die Wolken höher oder tiefer sind, als man fliegen wird. Zudem: stärkere Gewitter zeichnen sich durch hohe und höchste Wolken aus, sind also auf dem farbigen Satellitenbild gut zu erkennen. Ein echter Sicherheitsgewinn!

#### 4 Zusätzliche Informationsquellen

Es soll hier auf weitere nützliche Informationen aus dem Internet hingewiesen werden. Vor allem von Websites, die mit Forschungseinrichtungen in den USA und Europa sowie mit NOAA und NASA in Zusammenhang stehen, sind sehr viele, relevante Wetterinformationen abrufbar. Diese Quellen hat so mancher Pilot schätzen gelernt, dem das offizielle Wetterbriefing in Detailfragen nicht genügt. Im Folgenden möchte ich drei Beispiele vorstellen.

##### Beispiel 1

Winde, vom Satelliten gemessen, auf Grundlage des Wasserdampfbildes. Interessant ist dabei, dass die Winde der Höhe nach angezeigt werden. Vor dem Hintergrund des Wasserdampfschleiers zeichnen sich Luftmassen und Strömungsverhältnisse deutlich ab. So kann man auch Turbulenzgebiete leichter erahnen.

##### Beispiel 2

EUMETSAT verfügt über Bilder des Niederschlags (*Multisensor Precipitation Estimate*, siehe Abb. 8-16). Diese zeigen einerseits gut, wo stärkere Niederschläge über Land niedergehen, und vermitteln andererseits über den Ozeanen auch sehr schön ein Bild der Intensität von tropischen Wettersystemen. Die Niederschlagsintensitätsstufen sind vergleichbar mit denen des Bordwetterradars, wie dies Beispiel hier zeigt.

##### Beispiel 3

Bei keiner Flugvorbereitung ein Blick auf das aktuelle Sonnenwetter fehlen. Diese Darstellung des *Space Weather Prediction Centers* der NOAA (siehe Abb. 8-17) zeigt die für die Luftfahrt wichtigsten Komponenten auf einen Blick. So lassen sich Auswirkungen des Sonnenwitters auf Kurzwellenfunk, die Satellitennavigation oder auch

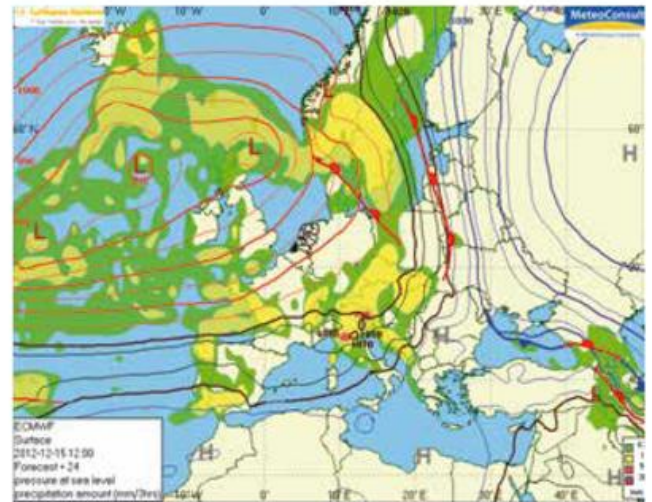


Abb. 8-13: Fronten und Niederschlagsvorhersagekarte des ECMWF (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Lufthansa Systems, Lido/Flight).

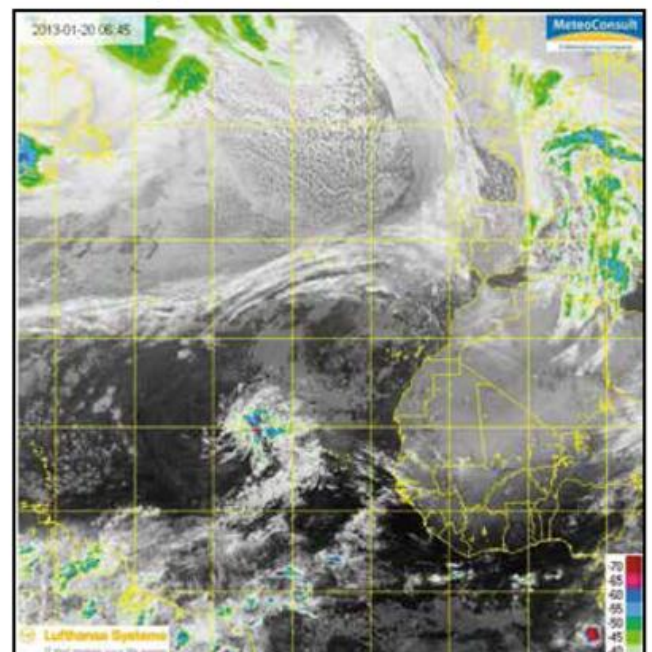


Abb. 8-14: Infrarot-Satellitenbild, mit Temperatur der höchsten Wolken (mit freundlicher Genehmigung der Fa. Lufthansa Systems, Lido/Flight).

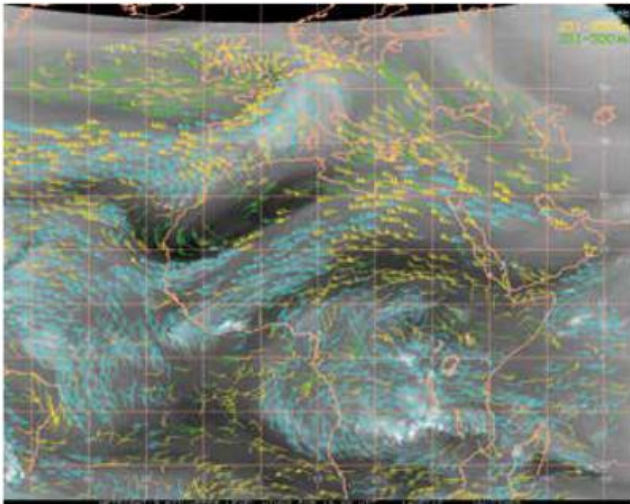


Abb. 8-15: Satellitenbild, Wasserdampfauswertung mit Winden (Quelle: EUMETSAT).

hinsichtlich möglicher Strahlenexposition für Menschen schon vor dem Flug erkennen.

### 5 Offene Fragen – aus Pilotensicht

Zum Abschluss meines Beitrages zum Flugwetter möchte ich einige Fragen ansprechen, die aus Pilotensicht einer Antwort bedürfen.

1. Auf welchen Gebieten besteht vorrangig Informations- und/oder Forschungsbedarf?

Modelle wie das HIRLAM der Niederlande bieten Vorhersagenkarten im Stundentakt - und dies mit guter Genauigkeit. Die dort erreichte Genauigkeit böte operationelle Vorteile, weil eine präzisere Einschätzung möglich wäre, und zwar von Konvektion, Niederschlagsart und -menge, Vereisung, Temperatur, Winden - auch für die Höhen zwischen Flugplatz und Reise Flughöhe. Die sicher nicht einfache Aufgabe wird sein, die Informationen dann dem Piloten gut aufbereitet zu präsentieren. Der Zeitrahmen für die Durchsicht eines durch Dispatcher zusammengestellten Briefing-Paketes ist eng; viel mehr als etwa zehn bis fünfzehn Minuten Zeit hat eine Besatzung nicht, um alle relevanten Dinge zu prüfen und den Treibstoff zu bestimmen. Wetter ist ein wichtiger Punkt; andere sind NOTAM (Meldungen für Luftfahrer, also zum Beispiel nicht nutzbare Anflughilfen, Landbahnsperren etc.), technischer Zustand der Maschine, Streckenführung und mehr.

2. Wo klaffen Wunsch und Realität zu Wetter im Cockpit auseinander ?

Nach Durchsicht der Standarddokumentation ist das Wissen der Crews über das Wetter nur lückenhaft. Winde in 4000 bis 5000 Fuß (850 mb), beispielsweise, sind unbekannt, obwohl sie die Kapazität von Flughäfen beeinflussen oder auch Hinweise auf Scherwinde geben. Ob Turbulenz gemeldet wurde, die während des Steig- oder Sinkflugs relevant wird, muss bei der Flugsicherung erfragt werden, und wo mögliche Gewitter stehen, sieht eine Besatzung erst richtig nach dem Start.

Bedarf für Forschung und Entwicklung ist vor allem beim Informationstransfer vorhanden. In den USA ist es schon lange möglich, sich das aktuelle Wettergeschehen im Cockpit darstellen zu lassen. Was es auf der einen Seite des Atlantiks für die Allgemeine Luftfahrt (*General Aviation*) und Geschäftsflieger gibt, sollte auch in Europa technisch ermöglicht werden. Die Flugzeuge der *General Aviation* und Geschäftsflieger sind meist schon darauf vorbereitet; die Flugzeuge der Fluggesellschaften stehen auf diesem Sektor noch vor einem Technologiesprung.

3. Welche Bedeutung haben Pilot Reports (PIREP) in der heutigen Zeit?

Grundlegende Parameter wie Temperatur und Wind haben in PIREPs durch technische Systeme wie AMDAR doch sehr an Bedeutung verloren. Es werden nur noch – selten – PIREPs abgesetzt, meist um andere Flugzeuge beispielsweise vor Turbulenz oder Vereisung zu warnen. Diese PIREPs werden von Fluglotsen auf Anfrage oder auch unaufgefordert an folgende Flugzeuge weitergegeben.

4. Wie werden PIREPs genutzt beziehungsweise für Piloten nutzbar gemacht?

Sie werden in Karten aufgenommen, die dann zum Beispiel in *pc\_met* einschbar sind. Diese Karten können aber nur am Boden eingesehen werden, und verlieren an Aktualität, bis ein Flugzeug dann gestartet ist.

Eine eher kurzfristige Nutzung besteht bei Aufnahme der PIREPs in die Wettermeldung von Flughäfen (ATIS). Dies geschieht regelmäßig, wobei allerdings auch hier die Aktualität der Meldungen oft zu wünschen übrig lässt. Praktiziert wird auch die Weitergabe der PIREPs an folgende Flugzeuge durch die Flugsicherung.

5. Wie häufig sind kritische Wettersituationen?

Nun, ein Pilot mit viel Selbstbewusstsein wird sicher eine Antwort dahingehend geben, das er so etwas nicht kennt,

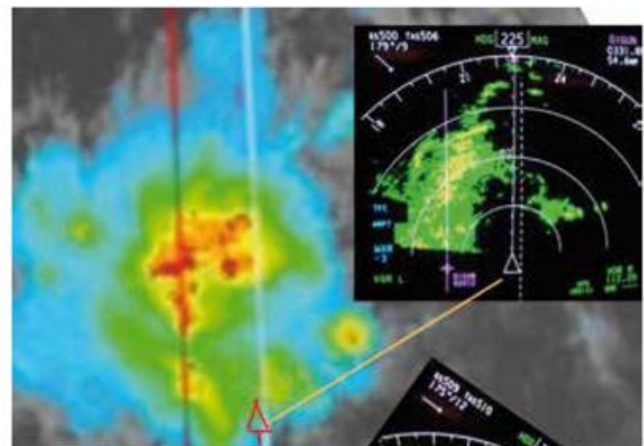


Abb. 8-16: EUMETSAT *Multi-Sensor precipitation estimate* und Bordwetterradar (mit freundlicher Genehmigung von CIMMS, Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin, Madison).

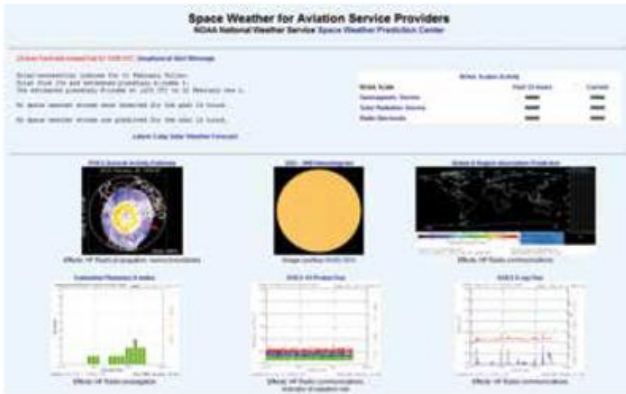


Abb. 8-17: Webseite des NOAA Space Weather Prediction Centers (Quelle: Space Weather Prediction Center, National Weather Service, USA).

noch nie erlebt hat, weil er eben ein guter Pilot ist. Diese Antwort würde entschieden zu kurz greifen, es gilt, zu differenzieren. Der Flughafen Egelsbach liegt etwas südlich von Frankfurt. Er zeichnet sich dadurch aus, dass er das größte Aufkommen an *General Aviation* und *Business-Flugzeugen* hat, welches ein Platz ohne Linienflugverkehr in Deutschland anzubieten hat. Was dem Platz fehlt, das ist ein Instrumenten-Anflugverfahren; er kann nur nach Sichtflugregeln angefliegen werden.

Wird nun beispielsweise bei einer Wolkenuntergrenze von 500 Fuß und Sicht um einen Kilometer in Frankfurt Rhein-Main der ganz normale Linienflugverkehr durchgeführt, ist Egelsbach nicht mehr anfliegbar (siehe dazu die Unfallanalyse im Beitrag 9 von M. Streicher).

Das gleiche Wetter, das den Normalbetrieb in Frankfurt zulässt, ist schon mehr als kritisch im Hinblick auf eine Landung in Egelsbach einzuschätzen. Sind Sichtflugbedingungen nötig, um fliegen zu können, wird es in Deutschland mit Sicherheit mehr „kritische“ Situationen geben als beispielsweise im sonnenverwöhnten Spanien.

Eine ähnliche Logik gilt im Hinblick auf den Ausrüstungsstand der Flugzeuge. Während die allermeisten Flugzeuge im Linienflugbetrieb auch Betriebsstufe 2 oder 3 (CAT 2/3) zugelassen sind, ist dies bei den übrigen Flugzeugen in Deutschland nur in Ausnahmefällen gegeben.

Eine Sicht von beispielsweise 400 Metern lässt Anflüge durch die Linienflugzeuge zu, nicht aber für die meisten anderen Flugzeuge. Somit wären 400 Meter Sicht kritisch oder eben nicht, je nach Flugzeug.

Weitere Wettererscheinungen, die eigentlich alle Flugzeuge ähnlich betreffen, wären Sturm, Gewitter, Hagel, Schnee, gefrierender Regen, Eisnebel, extreme Turbulenz und Vulkanasche. Piloten der Langstrecke haben zusätzlich noch mit Wirbelstürmen, Sandstürmen und Blizzards zu tun, die bei uns in Deutschland glücklicherweise sehr selten sind.

Besonders erschwerte Bedingungen herrschen, wenn nicht nur ein Flugplatz betroffen ist, sondern ein Sturm

wie Kyrill über weite Teile Deutschlands hinwegfegt, oder Schnee und Eis gleichzeitig einige größere Flughäfen betreffen. In diesen Fällen ist Chaos vorprogrammiert, weil die Dimension der Auswirkungen solcher großräumigen Ereignisse noch unzulänglich diagnostiziert und prognostiziert wird.

Was noch hinzukommt, das ist die Natur des Luftverkehrs: es ist ein sehr fein verzahntes Netzwerk, bei dem lokale Störungen schnell zu größeren Problemen im Gesamtzusammenhang führen. Hat ein Flugzeug große Verspätung, dann steht es zum Beispiel für den Folgeeinsatz nicht zur Verfügung. Gleiches gilt für die Besatzung.

Komme ich auf die ursprüngliche Fragestellung zurück, so denke ich, dass die richtige Antwort lautet: häufiger, als man meinen mag; Wetter ist und bleibt ein nicht zu vernachlässigendes Sicherheitsrisiko. Laut IATA *Safety Report* des Jahres 2006 hatten 43 % aller Unfälle einen Bezug zu „*adverse weather*“.

Zusammenfassend möchte ich hier zum Ende dieses Ausflugs in die praktische Luftfahrt-Meteorologie kurz einige grundsätzliche Aspekte und Fragen ansprechen. Zunächst wäre festzustellen, dass einerseits die Computer der Meteorologen, die Satelliten und Messinstrumente fast jährlich Quantensprünge in ihrer Leistungsfähigkeit erlangen - das andererseits aber die Briefing-Pakete für Piloten nur zu oft auf dem Schwarz-Weiß-Minimum-Standard des ICAO Annex 3 erstellt werden. Warum diese Diskrepanz besteht, vermag ich nicht zu sagen; gerade auch in der Verkehrsfliegerei findet der Einsatz moderner Informationstechnologien für Meteorologie nur in geringem Maße statt. Es böte große Vorteile hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Luftverkehrs, wenn den Piloten die Erkenntnisse der Meteorologie zeitgerecht und leicht erfassbar zugänglich gemacht würden. Wie dies in der Praxis dann aussehen kann, das könnte sich sehr gut aus einem intensivierten Dialog zwischen erfahrenen Praktikern, also aktiven Piloten und Meteorologen, ergeben. Solche Zusammenarbeit, da bin ich mir sicher, wird zu beiderseitigem Nutzen sein.

„Wetter“ ist, abschließend gesagt, Teil der Natur - und die Meteorologie bietet viele Möglichkeiten, sich dem „Wetter“ zu nähern. Praktische Erfahrung des „Wetters“ - das ist ein anderer, möglicher Weg. Meine Quintessenz hier: Die Natur ist stärker - und kaum durch Vorhersagen zu erfassen. Wer der Natur aber mit Demut begegnet, der kann sehr viel Freude haben und Schönes erleben.

### Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Kollegen der Arbeitsgruppen der Vereinigung Cockpit bedanken, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Mein besonderer Dank auch für die redaktionelle Überarbeitung, die in den Händen von Frau Fleckenstein lag.

M. STREICHER

# 9 Fallstudie eines wetterbedingten Flugunfalls

Case study of a weather-related aircraft accident

## Zusammenfassung

Bei Flugunfällen gehen vielfach Regelverstöße von Piloten gegen die Sichtflugregeln voran. Eine nicht zu unterschätzende Gefahr besteht insbesondere, wenn nach Instrumentenflugregeln geflogen wird, aber der Zielflughafen über keine Anflughilfen verfügt. Diese Unfälle und auch andere werden von der Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung (BFU) akribisch untersucht, will man doch Schwachstellen für die Zukunft minimieren. In diesem Artikel werden kurz die gesetzlichen und flugmeteorologischen Grundlagen beschrieben und anschließend beispielhaft ein Unfall dargestellt, der in den letzten Jahren in dieser Art immer wieder vorkam.

## Abstract

Very often pilots have violated visual flight rules (VFR) prior to a subsequent accident or incident. A serious and often underestimated risk occurs when a previously planned VFR flight is then due to changing weather conditions performed under instrumental flight rule conditions (IFR) but the destination airport lacks of the needed approach aids. The German Federal Bureau of Aircraft Accident Investigation (Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung BFU) investigates meticulously each accident in order to minimize the risk of accidents with the same cause in the future. This article first briefly describes the legal and aeronautical meteorological background. Then, it looks at a specific accident of the above type, which happened often in recent years.

## 1 Gesetzliche Grundlagen für Flugunfalluntersuchungen

Die Aufgaben der Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung ergeben sich aus dem Gesetz über die Untersuchung von Unfällen und Störungen beim Betrieb ziviler Luftfahrzeuge (**Flugunfall-Untersuchungs-Gesetz FLUUG**) vom 1. September 1998. Das Gesetz sieht eine unabhängige Untersuchung von Flugunfällen und schweren Störungen durch die Bundesstelle vor, insbesondere ohne eine Einflussnahme von Dritten.

Die Sicherheitsuntersuchung wird nach den Richtlinien und Empfehlungen des Annex 13 (*Aircraft-, Accident- and Incident and Investigation*) zum Abkommen über die Internationale Zivilluftfahrt und der Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Oktober 2010 über die Untersuchung und Verhütung von Unfällen und Störungen in der Zivilluftfahrt durchgeführt. Diese EU-Verordnung 996/2010 ist am 2. Dezember 2010 in Kraft getreten.

Danach hat die Sicherheitsuntersuchung ausschließlich zum Ziel, Erkenntnisse zu gewinnen, mit denen künftige Unfälle und Störungen verhütet werden können; die Auswertung des Vorkommnisses sowie die Schlussfolgerungen und Sicherheitsempfehlungen sollen nicht der Klärung der Schuld- beziehungsweise Haftungsfrage dienen. Dies

ist ausschließlich Sache der Gerichte. Oftmals spielen bei Flugunfällen Wettereinflüsse eine erhebliche Rolle. Der Deutsche Wetterdienst wird dabei vielfach um ein flugmeteorologisches Gutachten oder generelle Auskunft gebeten.

## 2 Sicht- und Instrumentenflug (VFR/IFR)

In Abhängigkeit von den Wetterbedingungen, Zulassung des Luftfahrzeuges und der Lizenzierung des Luftfahrzeugführers wird entweder nach Sichtflugregeln (*VFR Visual Flight Rules*) oder nach Instrumentenflugregeln (*IFR Instrumental Flight Rules*) geflogen. Während beim VFR nach Sicht gemäß den Sichtflugregeln der Luftverkehrsverordnung (LUFTVO) geflogen wird, erfolgt der Flug nach IFR fast ausschließlich durch die Instrumente im Cockpit und in Absprache mit dem Fluglotsen der Flugsicherung am Boden. Einschränkungen gibt es nur durch die Allwetterflugregeln, so zum Beispiel bei Nebel am Platz. Da nur die größeren internationale Flughäfen und Regionalflughäfen Anflughilfen für Instrumentenanflüge haben, gibt es auch eine große Anzahl von Flügen, insbesondere im gewerblichen Luftverkehr, die zwar überwiegend nach IFR fliegen, aber am Abflug- bzw. Zielort, wenn auch nur für kurze Zeit, auf Mindestbedingungen des Sichtfluges angewiesen sind. Es wird also während eines Fluges zwischen

VFR und IFR gewechselt. Als Beispiel sei dafür der Flughafen Egelsbach südlich von Frankfurt genannt. Dort ist ausschließlich VFR-Flugverkehr zugelassen. Egelsbach ist auch der VFR-Landeplatz in Deutschland mit dem höchsten Verkehrsaufkommen und weist auch eine hohe Anzahl von An- und Abflügen mit Flugregelwechsel (VFR/IFR) auf. In Egelsbach gab es seit 2009 bei Landungen drei wetterbedingte Flugunfälle mit Totalschäden und Toten. Alle hatten die gleiche Ursache. Trotz schlechtem Wetter (sehr tiefer Stratusbewölkung und geringer Sichtweiten) wurde angefliegen. Die Flüge wurden nach Instrumentenflugregeln (IFR) mit Endanflug in Egelsbach nach Sichtflugregeln (VFR) durchgeführt, da dort keine Instrumentenanflüge möglich sind. Diese Art des Flugplanes wird offiziell als „Y-Flugplan“ bezeichnet.

### 3 Der Flugunfall vom 01.03.2012

(Quelle: Statusbericht der BFU März 2012)

Die Cessna „Citation 750“ (auch „Citation X“) ist ein zweistrahliges Geschäftsreiseflugzeug mit einer zulässigen Abflugmasse von etwa 16 Tonnen. Sie befand sich am 1. März 2012 in Österreich auf einem Geschäftsreiseflug. In Linz startete das Flugzeug um 18.16 Uhr mit zwei Piloten und drei Fluggästen an Bord zu einem Flug nach Bratislava/Slowakei. Auf dem Weg nach Bratislava war eine Zwischenlandung in Egelsbach/Deutschland (EDFE) vorgesehen, wo ein weiterer Fluggast aufgenommen werden sollte. Für den Flug von Linz nach Egelsbach wurde ein „Y-Flugplan“ aufgegeben, der zunächst einen Flug nach Instrumentenflugregeln und dann einen Wechsel zu einem Flug nach Sichtflugregeln für die Landung vorsah. Der Flugverkehrslotse von der Frankfurter Anflugkontrolle erteilte eine Freigabe für einen Sichtanflug bei Nacht (VFR Nacht) auf den Verkehrslandeplatz Egelsbach. Der Beauftragte für Luftaufsicht (BfL) der Luftaufsichtsstelle Frankfurt-Egelsbach teilte dem Piloten mit, dass er auf der Piste 27 anfliegen kann. Bei 2500 ft AMSL erfolgte um 17.54 Uhr der IFR/VFR-Wechsel. Um 18.55:05 Uhr meldete der Lotse, dass der Platz noch 6 Meilen entfernt sei. Die Landebefeuerung einschließlich der Blitzlichter waren nach der aufgezeichneten Kommunikation zwischen Flugzeugbesatzung und Frankfurt-Egelsbach-Info eingeschaltet. Um 18.56:06 Uhr meldete der Radarhöhenmesser 500 Fuß AGL. Unmittelbar danach generierte das *Enhanced Ground Proximity Warning System* EGPWS - ein Warnsystem zur Vermeidung von Bodennäherungen - die Ansage, dass die Höhe über Grund gefährlich zu niedrig sei und dass das Flugzeug wieder steigen soll. Es war zu diesem Zeitpunkt aber schon zu spät und das Flugzeug kollidierte um 18.56:22 Uhr mit Bäumen. Im weiteren Verlauf wurden einzelne Teile des Flugzeuges durch Baumberührungen abgerissen. Etwa 430 m nach der ersten Baumberührung schlug das Flugzeug im Wald auf. Vor dem Aufschlag hatte sich das Flugzeug um die Längsachse in Rückenlage gedreht. Beide Tragflächen wurden etwa 25 m vor dem Aufprall am Boden durch Bäume abgerissen. Die Unfallstelle be-



Abb. 9-1: Die abgestürzte Cessna Citation an der Unfallstelle (Foto mit freundlicher Genehmigung der BFU).

find sich etwa 3,6 km (1,96 NM) vor der Schwelle der Piste 27 des Flugplatzes Frankfurt-Egelsbach. Das Flugzeug wurde durch den Aufprall und einen Aufschlagbrand zerstört (Abb. 9-1). Bei dem Unfall erlitten beide Piloten und die drei Fluggäste tödliche Verletzungen.

### 4 Meteorologische Informationen

Für die Untersuchung des Unfalls hat der Deutsche Wetterdienst im Auftrag der Bundesstelle für Flugunfalluntersuchungen ein amtliches Gutachten über die Wettersituation in der Nähe des Verkehrslandeplatzes Frankfurt-Egelsbach zum Unfallzeitpunkt erstellt. Zu überprüfen ist dabei immer, in wie weit sich der Pilot mit meteorologischen Unterlagen vorbereitet hat. Eine individuelle Flugwetterberatung von einer unserer Luftfahrtberatungszentralen wurde nicht erteilt. Eine Recherche bei Austro Control in Linz war ebenfalls negativ. Laut BFU-Bericht hat ein auf Flugvorbereitung spezialisiertes Unternehmen im Rahmen eines Dienstleistungsvertrags die Flüge für den Betreiber des Flugzeuges vorbereitet. Dazu gehörte auch die meteorologische Flugvorbereitung. Der Zeitpunkt des Abrufs war gegen 09.17 Uhr lokaler Zeit. Es wurden Standardwetter wie TAFS (*Terminal Aerodrome Forecast*), Höhenwindkarten, signifikante Wetterkarte und das Platzwetter von Egelsbach von 08.50 Uhr übermittelt. Für einen Abflug in Linz um 18.16 Uhr wäre bei der Wetterlage ein zeitnahes Wetterbriefing sinnvoll gewesen.

#### 4.1 Wetterlage

Am 1. März 2012 war im Rhein-Main-Gebiet ein Hochdruckgebiet wetterbestimmend, das sich von Großbritannien über Deutschland bis zum Balkan erstreckte. Dabei wurde milde und stabil geschichtete Luft herangeführt. Unterhalb einer Absinkinversion hielt sich ganztägig eine feuchte Grundschicht mit Obergrenzen bei etwa 2 000 ft AMSL. Es hatte sich verbreitet Nebel und Hochnebel gebildet, der sich am Nachmittag im Rhein-Main-Gebiet im Gegensatz zur Umgebung nur sehr zögernd, teilweise auch gar nicht auflöste.

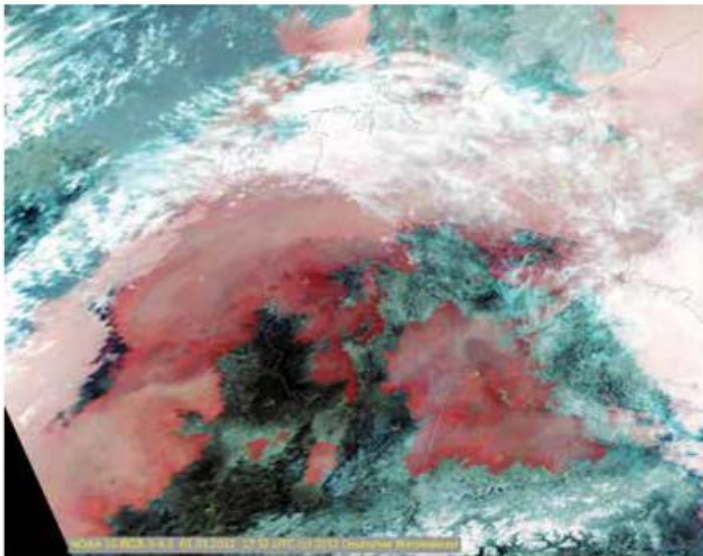


Abbildung 9-2: VIS-Satellitenbild vom 01.03.2012, 17.52 UTC.

#### Wolkenuntergrenzen und Sichten

In dem Wettergutachten wurde die Wolkenuntergrenze am Unfallort mit 540 ft AMSL errechnet. Begründet wird das Ergebnis mit der Tatsache, dass die Wettermeldestelle Egelsbach auf etwa 380 ft AMSL liegt. Die Höhe des Absturzorts liegt bei 640 ft AMSL. Dies ergibt eine Differenz von 260 ft. Bei einer Wolkenuntergrenze von 2 Achtel in 800 ft AGL in Egelsbach würde das für den Unfallort eine Wolkenuntergrenze von 540 ft AGL bedeuten. Da die Absturzstelle aber im Wald lag, kann dort der Bedeckungsgrad infolge der höheren Feuchtekapazität über Wäldern deutlich höher und auch die Sichten schlechter gewesen sein. Auch ist beim Anflug die Schrägsicht vom Flugzeug aus relevant. Die ist bei Inversionswetterlagen meist schlechter, wie die horizontale Bodensicht.

#### 4.2 Meteorologische Flugvorbereitung für den Flug

Am Ereignistag standen für die meteorologische Flugvorbereitung folgende Wetterinformationen zur Verfügung. Folgende Routinewettermeldungen (METAR) und Flugplatzwettervorhersagen (TAF):

METAR 1520 EDFE 03005KT 7000 BKN007 10/09 Q1025  
 METAR 1550 EDFE 03005KT 8000 SCT008 10/08 Q1025  
 METAR 1620 EDFE 36005KT 8000 FEW008 10/08 Q1025

TAF AMD EDDF 011506Z 0116/0218 05004KT 9000  
 BKN007 BECMG 0116/0117 SCT007 BECMG 0200/0203  
 4000 BR BKN012 TEMPO 0203/0208 0400 FG=

Aus den Wettermeldungen und dem TAF ist ersichtlich, dass mit tiefer Stratusbewölkung im Anflug gerechnet werden musste und kein Sichtflugwetter vorherrschte.

Abb. 9-2 stellt ein visuelles Bild eines polarumlaufenden Satelliten dar. Das hochauflösende Bild mit 1 km Auflösung (NOAA 16 RGB) ist geeignet zur Erkennung von Nebel oder Hochnebel. Je tiefer rot die Einfärbung ist,

desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für tiefen Stratus beziehungsweise Nebel. Südlich von Frankfurt (F) ist Egelsbach mit einem „+“-Zeichen markiert. Man sieht in diesem Bereich eine deutliche rötliche Einfärbung. Das ist ein Erkennungsmerkmal, dass Nebel oder Hochnebel zu diesem Zeitpunkt vorherrschte.

#### 4.3 Wetterangaben von Zeugen

Die Besatzung eines in Egelsbach stationierten Polizeihubschraubers berichtete, dass ein Einsatzflug für die Suche der Unfallstelle etwa 15 Minuten nach dem Unfall aufgrund mangelnder Sicht abgebrochen werden musste. Die Wahrscheinlichkeit ist damit sehr groß das dies auch schon zum Unfallzeitpunkt so war.

#### 5 Weitere Unfälle

Am 7. Dezember 2009 kam es mit einer Beechcraft King Air F90 im Anflug auf den Verkehrslandeplatz Frankfurt-Egelsbach zu einem Unfall, bei dem der Pilot und zwei Fluggäste tödlich verletzt wurden. Die Unfallstelle befand sich etwa 50 m von der Unfallstelle der Cessna Citation 750 entfernt. Die Wetterlage war dabei ähnlich, es wird angefliegen obwohl die Mindestwetterbedingungen nicht gegeben sind.

#### 6 Resümee

Der Towerlotse in Egelsbach hatte kein Weisungsrecht und keine Beratungspflicht. Er teilt landenden Flugzeugen nur das aktuelle Platzwetter mit und gibt die Landebahn frei. Die Entscheidung für einen VFR-Anflug liegt ausschließlich beim verantwortlichen Flugzeugführer (LuftVO). Bei den Piloten handelte es sich, wie auch bei allen ähnlichen Flugunfällen, um sehr erfahrene Personen mit langjährigen Erfahrungen auf dem Flugzeugmuster. Sie haben eine Berechtigung für den Instrumentenflug, fliegen aber nur bei An- oder Abflügen (selten) nach Sichtflugregeln. Ursächlich für den Absturz war das Einfliegen in tiefe Stratusbewölkung mit einer Reduzierung der Flugbeziehungsweise Schrägsicht. Dies ist bei Y-Flügen ein immer wieder auftretendes Problem. Aus Zeit- und Kostengründen wird auf eine sichere Alternative, in diesem Fall eine Landung nach Instrumentenflugregeln am Frankfurter Flughafen, verzichtet. Solange die Entscheidung für einen Start oder Landung nur beim Flugzeugführer liegt, werden solche Unfälle an kleineren Plätzen immer wieder auftreten. Der dargestellte Unfall zeigt aber auch, dass trotz einer zunehmenden Technisierung, die Flugwettervorhersage ihren Stellenwert hat. Genaue Flugplatzwettervorhersagen und ein zeitnahe Wetterbriefing vor einem solchen Flug sind für die Sicherheit wichtig. Im Zweifelsfall ist für einen Piloten eine individuelle Flugwetterberatung, selbst bei den ihm zur Verfügung stehenden Selbstbriefingssystemen, hilfreich. Ein Flugwetterberater hätte mit einem hochauflösendem, sichtbaren Satellitenbild auf die Gefahr

des sich verdichtenden Nebels hinweisen können und eine alternative Landung am Frankfurter Flughafen nach IFR empfehlen können.

### Danksagung

Für die freundlicher Unterstützung im technischen Bereich und die Bereitstellung des Unfallbilds durch die Bundesstelle für Flugunfalluntersuchungen in Braunschweig (BFU) bedanke ich mich.

### Literatur

BFU, 2012: Statusbericht der BFU zum Unfall in Egelsbach vom März 2012. *Bundesstelle für Flugunfalluntersu-*

*chungen*, www.bfu-web.de.

EU, 2010: Verordnung 996/2010 vom 20. Oktober 2010 über die Untersuchung und Verhütung von Unfällen und Störungen in der Zivilluftfahrt. *Amtsblatt der Europäischen Union*, 295/35- L295/50, vom 12.11.2010.

FLUGUNFALLUNTERSUCHUNGSGESETZ (FLUUG), 1998: Nationales Gesetz Umsetzung von Annex 13 ICAO, vom 1. September 1998.

ICAO, 2010: Aircraft accident and incident investigation to the convention on international civil aviation. *International Standards and recommendations ANNEX 13*, 10<sup>th</sup> Edition.

LUFTVERKEHRSORDNUNG (LuftVO), §3 ff.

SCHUBERDT, C.-H., 2008: Flugunfälle. Flugunfalluntersuchung in Deutschland. *Motorbuchverlag*, Stuttgart, 320 S.

R. SAUSEN, S. MATTHES

# 10 Einfluss des Flugverkehrs auf das Klima

## Impact of aviation on climate

### Zusammenfassung

Der Flugverkehr hat einen nicht zu vernachlässigenden Anteil am Klimawandel und ist in der Vergangenheit besonders schnell gewachsen. Neben der Emission des Treibhausgases  $\text{CO}_2$  wirkt der Luftverkehr durch Veränderung der Ozon- und Methan-Konzentration, durch Bildung zusätzlicher Wolken (Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren) sowie eine Reihe weiterer Effekte auf das Klima. Insgesamt trägt der Luftverkehr nach derzeitigem Wissensstand knapp 5 % zum anthropogenen Strahlungsantrieb bei. Die Klimawirkung der Nicht- $\text{CO}_2$ -Effekte kann durch eine ökoeffiziente Planung von Flugtrajektorien verringert werden.

### Abstract: Impact of aviation on climate.

Aviation noticeably contributes to climate change, and the aviation contribution has been growing particularly fast. Beside the emission of the greenhouse gas  $\text{CO}_2$ , aviation impacts climate by changing the atmospheric concentrations of ozone and methane, by forming additional clouds (contrails and contrail cirrus) and various further effects. In total, aviation contributes nearly 5 % to the total anthropogenic radiative forcing. The climate impact of the non- $\text{CO}_2$  effects can be mitigated by eco-efficient planning of flight trajectories.

## 1 Einleitung

Der Flugverkehr erfüllt nicht nur Bedürfnisse nach Mobilität von Personen sowie nach schnellem Transport von Gütern über weite Strecken und trägt so erheblich zu Wohlstand bei, sondern der Luftverkehr hat auch

Anteil an der globalen Erwärmung und verändert damit indirekt auch das Wetter. Wie wir weiter unten sehen werden, ist einerseits der Beitrag des Luftverkehrs zur anthropogenen Klimaänderung deutlich größer, als es seinen  $\text{CO}_2$ -Emissionen entspricht. Andererseits gibt es beim Luftverkehr Möglichkeiten zur Minderung seiner Klimawirkung, die in ähnlicher Weise bei anderen menschlichen Aktivitäten nicht gefunden werden.

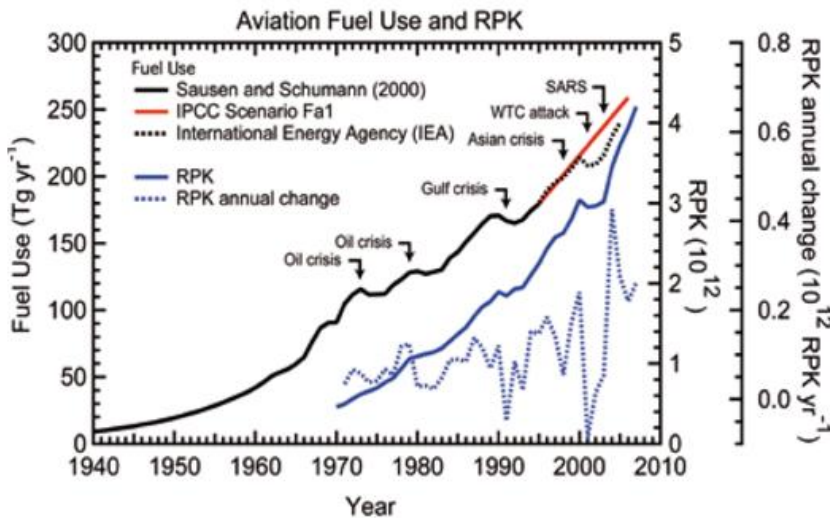


Abb. 10-1: Transportvolumen (als bezahlte Passagierflugkilometer RPK = *revenue passenger kilometres*, blau ausgezogene Kurve) und jährliche Änderungen (blau gestrichelt) seit 1970 und Treibstoffverbrauch (*fuel use*) durch den Flugverkehr seit 1940 (schwarze Kurve). Quelle: Fig. 2 aus LEE et al. (2009).

Der weltweite Luftverkehr hat in den vergangenen Jahren sehr stark zugenommen. Von 1970 bis 2005 wuchs die Transportvolumen (gemessen in *Revenue Passenger Kilometre* (RPK), also in bezahlten Flugkilometern) um mehr als den Faktor 8 (Abb. 10-1). Gleichzeitig stiegen der globale Treibstoffverbrauch und damit die  $\text{CO}_2$ -Emissionen um mehr als das 2,5-fache an (LEE et al. 2009). Diese machen 2 bis 3 % aller anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus. Globale Krisen führten allenfalls zu kurzfristigen Einbrüchen im Treibstoffverbrauch. Dass letzterer nicht so schnell zunahm wie die Transportleistung, ist im Wesentlichen auf effizientere Flugzeuge und höhere Auslastung zurückzuführen. Innerhalb der Euro-

päischen Union (EU15), die gemäß dem Kyoto Protokoll verpflichtet war, bis 2012 ihre CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen um 8,0 % im Vergleich zu 1990 zu senken, stiegen im Zeitraum von 1990 bis 2010 die entsprechenden Emissionen des internationalen Luftverkehrs (*aviation bunkers*<sup>1</sup>) um 95,4 %, während die Gesamtemissionen (ohne *aviation bunkers und marine bunkers*<sup>1</sup>) im gleichen Zeitraum um 11,3 % abnahmen<sup>2</sup>. Der Anteil des internationalen Luftverkehrs an den CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen stieg von 1,6 % auf 3,5 %. Wenn sich die Trends der letzten zwei Dekaden in ähnlicher Weise fortsetzen, könnte der Anteil des Luftverkehrs bis 2020 auf rund 5% zunehmen.

Neben der Emission des Treibhausgases CO<sub>2</sub> trägt der Flugverkehr noch auf mehreren anderen Wegen zur Klimaänderung bei (Abb. 10-2), und zwar durch

- Emission weiterer Treibhausgase wie Wasserdampf,
- Emission indirekter Treibhausgase wie NO<sub>x</sub>, das wiederum die O<sub>3</sub>- und somit auch die CH<sub>4</sub>-Konzentration beeinflusst,
- Emission von Partikeln wie Ruß oder Partikelvorläufern wie SO<sub>2</sub>,
- Bildung zusätzlicher Wolken (Kondensstreifen, Kondensstreifen-Zirren),
- indirekte Wolkeneffekte (Änderung von Bedeckungsgrad oder Wolkeneigenschaften) wie die Bildung von so genanntem Soot-Cirrus.

Grundsätzlich treten die hier genannten Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte bei vielen anderen anthropogenen Einflüssen auf das Klima auf, jedoch sind beim Luftverkehr diese Effekte verhältnismäßig groß<sup>3</sup>.

Die verschiedenen Klimaeffekte, die beim Flugverkehr auftreten, wurden im Hinblick auf das anhaltende Wachstum des Luftverkehrs in einer Vielzahl von wissenschaftlichen Publikationen untersucht und in mehreren Sachstandsberichten beschrieben (zum Beispiel IPCC 1999, SAUSEN et al. 2005, LEE et al. 2009, SAUSEN et al. 2012).

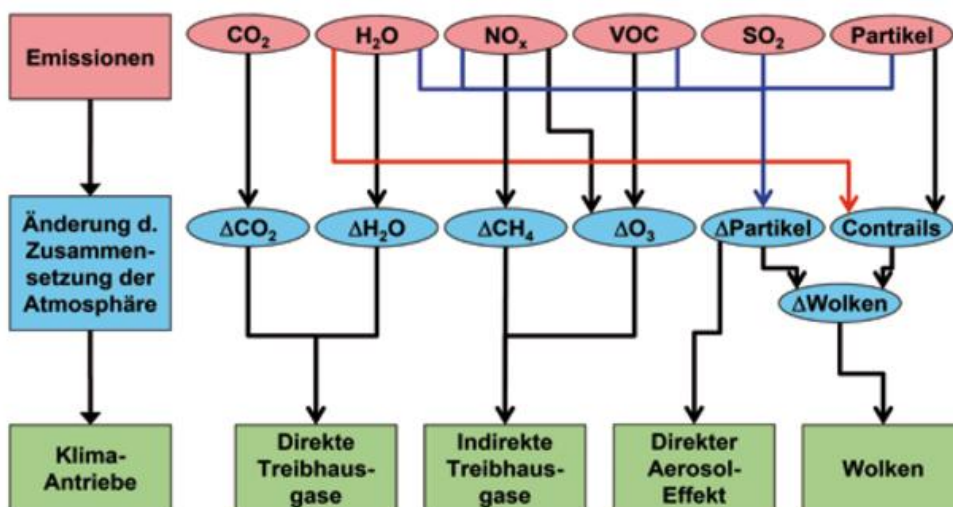


Abb. 10-2: Vereinfachte Darstellung der Wirkungskette „Flugverkehrsemissionen → Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre → Klima-antriebe“.

## 2 Strahlungsantrieb als Maßzahl

Will man bei der Betrachtung von Klimaeffekten über eine qualitative Beschreibung hinausgehen, muss man eine Möglichkeit schaffen, die verschiedenen Klimaeffekte quantitativ zu vergleichen. Wegen unterschiedlicher Lebensdauer und räumlicher Muster der Effekte ist das eine schwierige Aufgabe, für die es keine allgemein gültige Lösung gibt. Daher sind viele verschiedene Maßzahlen oder Metriken vorgeschlagen worden. Man kann Emissionen mittels ihrer Masse vergleichen oder hinsichtlich einer gewichteten Masse. Für die Klimawirkung ist es sinnvoll, die durch eine einzelne Emission verursachte Änderung der global gemittelten Temperatur zu betrachten. Eine detaillierte Behandlung unterschiedlicher Metriken würde jedoch den Rahmen dieses Kapitels sprengen. Für die folgenden Ausführungen beschränken wir uns trotz bekannter Schwächen auf den Strahlungsantrieb (siehe auch SAUSEN 2004), eine Maßzahl, die auch vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) gerne verwendet wird.

Machen wir nun ein Gedankenexperiment und betrachten wir die Atmosphäre im Quasi-Gleichgewicht, zum Beispiel in der vorindustriellen Zeit. Die Atmosphäre befindet sich dann (im Jahresmittel) im Strahlungsgleichgewicht, das heißt, einfallende solare Strahlung und die langwellige terrestrische Strahlung in den Weltraum kompensieren sich. Nun bringen wir instantan eine strahlungsaktive Substanz (zum Beispiel zusätzliches CO<sub>2</sub>) in die Atmosphäre ein oder ändern instantan die Albedo. Gleichzeitig halten wir alle anderen atmosphärischen Variablen auf ihrem Gleichgewichtswert. Das Strahlungsgleichgewicht ist nun gestört. Die Differenz aus solarer Strahlung und terrestrischer Strahlung nennen wir Strahlungsantrieb (*Radiative Forcing* (RF), gemessen in W/m<sup>2</sup>). Wenn RF positiv ist, also die solare Strahlung jetzt die terrestrische überwiegt, wird sich die Atmosphäre solange erwärmen, bis ein neues Gleichgewicht erreicht ist. Umgekehrt erfolgt bei negativem RF eine Abkühlung.

RF ist keine Observable, das heißt es kann prinzipiell nicht gemessen werden. RF ist vielmehr ein theoretisches Konstrukt, das nur berechnet werden kann. Das ist in der Regel mit deutlich geringerem Aufwand möglich als zum Beispiel die Bestimmung der zugehörigen Änderung des Klimas. RF hängt ab vom Zustand der ungestörten Atmosphäre im Quasi-Gleichgewicht und von Größe und Art der eingebrachten Störung. Aus

<sup>1</sup> Bei den hier betrachteten CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen handelt es sich um die Rahmen der UNITEDNATIONS Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) berichteten Werte, siehe [www.unfccc.int](http://www.unfccc.int).

<sup>2</sup> Bei Zahlen für 2010 wirkt sich die jüngste Bankenkrise jeweils mit um einige Zehntel von Prozentpunkten niedrigeren Werten aus.

<sup>3</sup> Auch bei der Schifffahrt gibt es relativ große Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte, wie die Bildung zusätzlicher niedriger Wolken aufgrund von Schwefelemissionen.

### Aviation Radiative Forcing Components in 2005

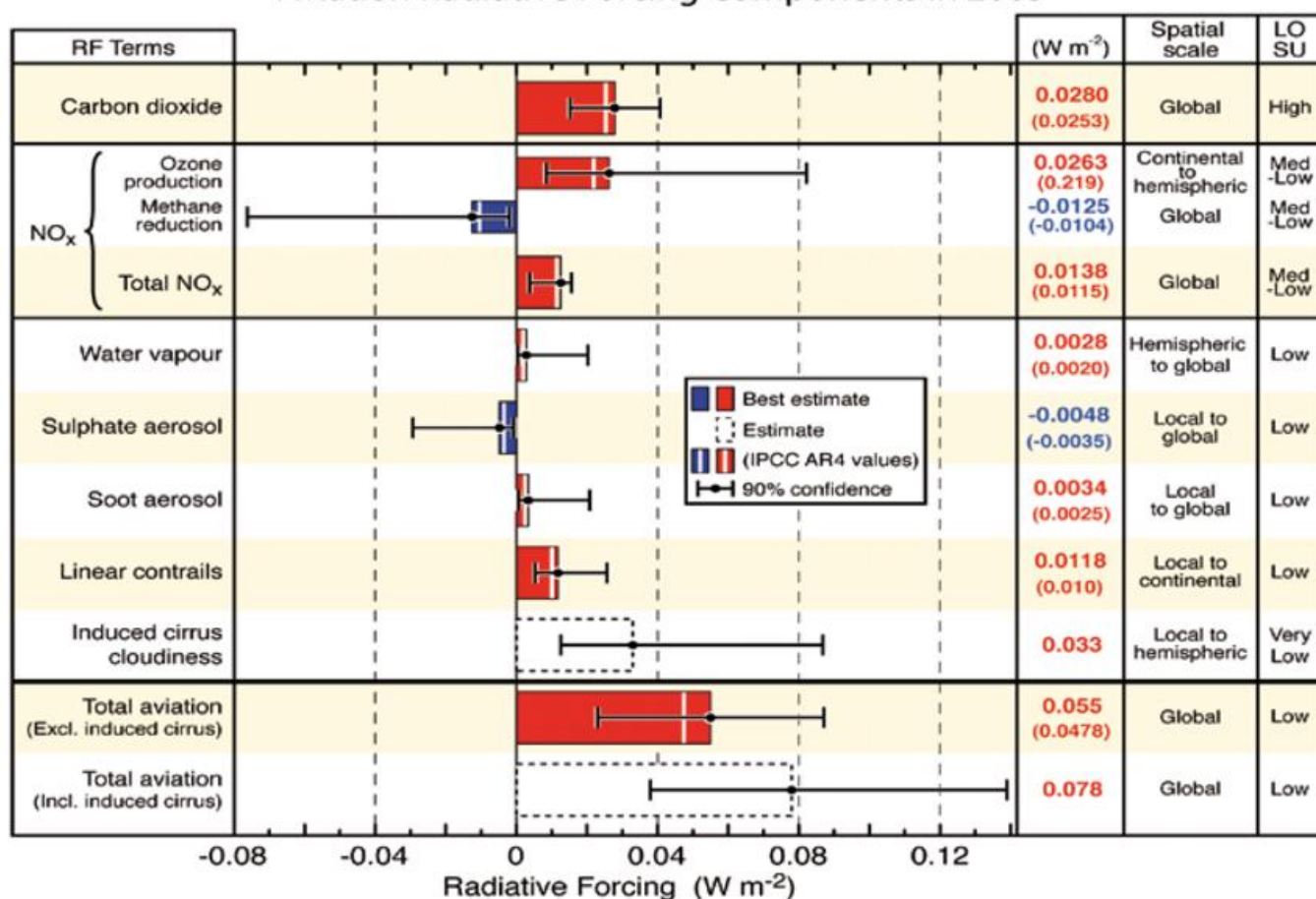


Abb. 10-3: Strahlungsantriebe (RF = Radiative Forcing) des Luftverkehrs aufgrund verschiedener Emissionen für das Jahr 2005 (Balken). Die weißen Linien kennzeichnen die Werte aus dem 4. Sachstandbericht des IPCC. Die Unsicherheitsbereiche kennzeichnen jeweils das 90%-Konfidenzintervall. Das zu „Total NO<sub>x</sub>“ gehörende Intervall wurde unter der Annahme bestimmt, dass Ozonaufbau und Methanabbau zu 100 % korreliert sind. Die in der drittletzten Spalte angegebenen Werte sind die zu den Balken gehörenden numerischen Werte. (Die Zahlen in Klammern gehören jeweils zur weißen Linie.) Die vorletzte Spalte beschreibt die räumliche Skala des zugrunde liegenden Prozesses. Die letzte Spalte ist eine Abschätzung des jeweiligen wissenschaftlichen Verständnisses (LOSU = *level of scientific understanding*). Quelle: Fig. 4 aus LEE et al. (2009).

Erfahrung weiß man, das  $RF^4$  in erster Ordnung proportional zur erwarteten Gleichgewichtsänderung der global gemittelten Bodentemperatur  $\Delta T_s$  ist (siehe auch IPCC 1996).

$$\Delta T_s = \lambda RF, \tag{1}$$

wobei  $\lambda$  der so genannte Klimasensitivitätsparameter ist. Für sehr viele Klimaantriebe ist  $\lambda$  unabhängig von der Art und Größe des Antriebes (siehe auch PONATER et al. 2012).

Während das hier definierte  $RF$  sehr gut geeignet ist, atmosphärische Prozesse zu verstehen und anthropogene Einflüsse auf das Klima zu quantifizieren, ist es völlig ungeeignet, um Emissionen zu regulieren oder zum Beispiel diese mit Gebühren zu belegen. Denn  $RF$  ist eine so genannte rückwärts schauende Metrik, das heißt  $RF$  beschreibt die Wirkung der kumulierten Emissionen der Vergangenheit bis zu dem Zeitpunkt, für den  $RF$  bestimmt wird.  $RF$  sagt praktisch nichts aus über die Wirkung einer noch regulierbaren zukünftigen Emission.

### 3 Beiträge des Flugverkehrs zum Strahlungsantrieb

Bei der Verbrennung von Treibstoff in einem Flugzeugtriebwerk entstehen als primäre Verbrennungsprodukte  $CO_2$  und  $H_2O$ . Als (unerwünschte) Nebenprodukte emittieren die Triebwerke eine Reihe weiterer Stoffe, jedoch in Konzentrationen mehr als zwei Größenordnungen geringer als die primären Produkte, unter anderem  $NO_x$  (als Folge der Oxidation von  $N_2$  aus der Luft),  $SO_x$  (als Folge der Oxidation von im Treibstoff befindlichem Schwefel),  $CO$ , flüchtige organische Verbindungen (VOC) und Ruß (alle als Folge einer unvollständigen Verbrennung des Treibstoffes) sowie Metallpartikel (aus Abrieb im Triebwerk). Im Folgenden betrachten wir die wesentlichen Beiträge (siehe auch Abb. 10-2); wenn nicht anders vermerkt beruhen die Zahlenwerte, die wir für das Jahr 2005 angeben, auf LEE et al. (2009). Die angegebenen Zahlenwerte sind mit (teilweise erheblichen) Unsicherheiten behaftet, die in Abb. 10-3 in Form der 90 %-Konfidenzintervalle quantifiziert sind. Bei einigen Komponenten ist das

<sup>4</sup>Streng genommen muss man das sogenannte *stratosphere-adjusted tropopause radiative forcing* oder *fixed dynamic heating radiative forcing* verwenden (siehe auch SAUSEN 2004). Dieses  $RF$  wurde auch zur Bestimmung der Zahlenwerte im folgenden Abschnitt verwendet. Wir haben hier zur Vereinfachung nur den instantanten Strahlungsbetrieb definiert.



Abb. 10-4: Satellitenbild von persistenten, gealterten Kondensstreifen am 4. Mai 1995 über Mitteleuropa. Quelle: DLR.

wissenschaftliche Verständnis noch niedrig. Hier können sich die Zahlenwerte im Verlaufe der weiteren Forschung erheblich ändern.

### 3.1 Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

Das emittierte Kohlendioxid ist der wichtigste Beitrag zum luftverkehrsbedingten Strahlungsantrieb. Mit 28 mW/m<sup>2</sup> (Abb. 10-3) hat es einen großen Anteil am gesamten luftverkehrsbedingten *RF*. CO<sub>2</sub> hat von allen hier betrachteten Stoffen die längste Lebensdauer. Ein großer Anteil bleibt etliche Jahrzehnte in der Atmosphäre, während Teile sogar Jahrtausende verweilen. Wegen dieser langen Lebensdauer ist die Wirkung von CO<sub>2</sub> unabhängig von Ort, Höhe und Zeitpunkt der Emission. Der Beitrag des Luftverkehrs zur CO<sub>2</sub>-Konzentration im Jahr 2005 umfasst zum Beispiel noch erhebliche Beiträge aus der Mitte des vorherigen Jahrhunderts. Selbst wenn die Emissionen konstant blieben, würde die CO<sub>2</sub>-Konzentration noch viele Jahrzehnte ansteigen (zum Beispiel SAUSEN und SCHUMANN 2000).

### 3.2 Wasserdampf (H<sub>2</sub>O)

Obwohl H<sub>2</sub>O von der Masse her die zweitwichtigste Emission der Flugzeuge ist, fällt der zugehörige Strahlungsantrieb mit 2,8 mW/m<sup>2</sup> sehr klein aus. Dennoch ist der Strahlungsantrieb aufgrund des H<sub>2</sub>O aus dem Flugverkehr erheblich größer als er es aufgrund einer vergleichbar großen Quelle am Erdboden wäre. In der Troposphäre wird H<sub>2</sub>O durch Niederschlag rasch aus der Atmosphäre entfernt, in der unteren Stratosphäre beträgt die Lebensdauer jedoch einige Wochen.

<sup>5</sup> Dieser Beitrag wird in Abb. 10-3 nicht betrachtet.

### 3.3 Stickoxid (NO<sub>x</sub>)

Stickoxidemissionen, als chemisch stark aktive Spezies, führen sowohl zu einem positiven Strahlungsantrieb über die Bildung von Ozon (O<sub>3</sub>) als auch zu einem negativen *RF* über die vermehrte Zerstörung des Klimagases Methan (CH<sub>4</sub>). Der Strahlungsantrieb über Ozon wird mit 26,3 mW/m<sup>2</sup> angegeben. Der Methan-Strahlungsantrieb wird mit -12,5 mW/m<sup>2</sup> beziffert. Mit der veränderten CH<sub>4</sub>-Konzentration ist eine schwächere Ozonbildung verbunden (negatives *RF*). Eine Betrachtung der geographischen Verteilung der Strahlungsantriebe und der Lebensdauern zeigt deutlich unterschiedliche Eigenschaften. Ozon hat eine Lebensdauer von mehreren Wochen (kurzlebig), während die atmosphärische Lebensdauer von Methan bei etwa 10 Jahren liegt (langlebig). Die Summe aus dem positiven *RF* vom Ozon und dem negativen *RF* vom Methan ergibt einen Strahlungsantrieb von 13,8 mW/m<sup>2</sup>. Wird zusätzlich der mit CH<sub>4</sub>-Abbau verbundene (sekundäre) Ozonverlust<sup>5</sup> (negatives *RF*) berücksichtigt, so ergibt sich ein Strahlungsantrieb der Stickoxidemissionen von 2,9 mW/m<sup>2</sup> (HOOR et al. 2009), der auch bei Betrachtung der Unsicherheiten positiv bleibt (HOLMES et al. 2011), lediglich UNGER (2011) kommt zu einem leicht negativem Gesamtwert.

### 3.4 Partikel

Partikel (feste und flüssige) werden entweder direkt vom Luftverkehr emittiert (zum Beispiel Ruß) oder entstehen aus Vorläufersubstanzen (zum Beispiel Sulphat-Aerosol aus emittiertem SO<sub>2</sub>). Ihr direkter Beitrag zum Strahlungsantrieb ist vergleichsweise klein. Ruß wirkt erwärmend (*RF* = 3,4 mW/m<sup>2</sup>), während Sulphat-Aerosol zu einer Abkühlung führt (*RF* = -4,8 mW/m<sup>2</sup>).

### 3.5 Wolken

Kondensstreifen sind (im direkten Sinne) der offensichtlichste Beitrag des Flugverkehrs zum Klimawandel. Ihre Entstehung kann mit dem Schmidt-Appleman-Kriterium

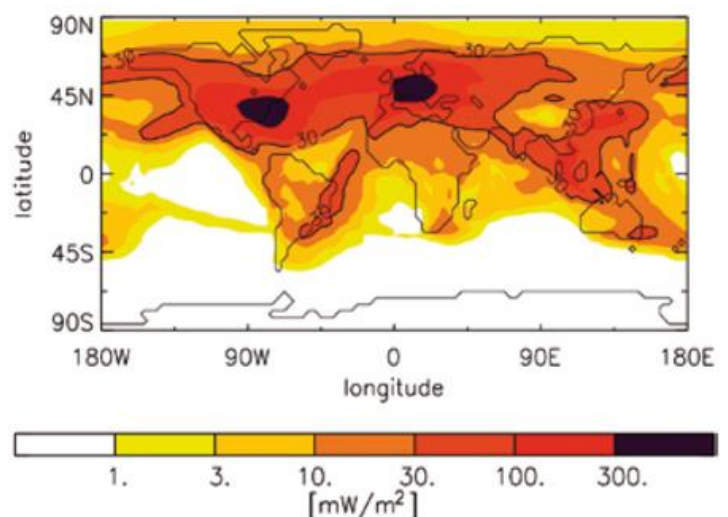


Abb. 10-5: Strahlungsantrieb aufgrund von Kondensstreifen-Zirren (einschließlich linearer Kondensstreifen) für 2002. Quelle: Fig. 3 aus BURKHARDT und KÄRCHER (2011).

thermodynamisch erklärt werden (Details siehe zum Beispiel SCHUMANN 1996). Die Bildung von Kondensstreifen wird durch die Emission von Wasserdampf in hinreichend kalte Luft ausgelöst. Wenn die Umgebungsluft relativ zu Eis übersättigt ist, können Kondensstreifen unter Aufnahme von Wasser aus der Umgebung wachsen und längere Zeit (bis zu mehreren Stunden) am Himmel verweilen. Sie können im Lauf ihres Lebenszyklus ihre zunächst lineare Form verlieren und sich zu so genannten Kondensstreifen-Zirren weiter entwickeln, die sich, abgesehen von ihrer Herkunft, nicht mehr von natürlichen Zirren unterscheiden (Abb. 10-4). Wie alle Wolken haben auch Kondensstreifen und Kondensstreifen-Zirren zwei gegenläufige Wirkungen auf das Klima: zum einen reflektieren sie die solare Strahlung mit einem negativen  $RF$ , zum anderen absorbieren und emittieren sie langwellige Strahlung mit einem positiven  $RF$ . Bei einer einzelnen Wolke kann der Netto-Strahlungsantrieb sowohl positiv (erwärmend) als auch negativ (abkühlend) sein. Bei niedrigem Sonnenstand dominiert eher die Abkühlung, bei hohem Sonnenstand und nachts dominiert die Erwärmung.

Der globale Bedeckungsgrad durch lineare Kondensstreifen wurde erstmals von SAUSEN et al. (1998) für das Jahr 1992 abgeschätzt; das diente als Grundlage zur Berechnung des zugehörigen  $RF$ . Auf der Basis neuerer Emissionskataster des Flugverkehrs berechneten LEE et al. (2009) einen globalen Netto-Strahlungsantrieb von  $11,8 \text{ mW/m}^2$  für 2005 (siehe auch Abb. 10-3). Der Strahlungsantrieb von Kondensstreifen-Zirren (inklusive linearer Kondensstreifen) konnte in früheren Arbeiten nur durch Korrelationsstudien grob abgeschätzt werden. Als mittlerer Wert für 2005 ergaben sich  $33 \text{ mW/m}^2$ . Dieser Wert liegt nicht allzu weit weg von der ersten Berechnung mit Hilfe eines komplexen Klimamodells (Abb. 10-5). BURKHARDT und KÄRCHER (2011) berücksichtigten nicht nur das Wachstum von Kondensstreifen zu Kondensstreifen-Zirren, sondern auch deren Rückkopplung auf natürliche Zirren. Letzteren steht wegen der Konkurrenz durch die Kondensstreifen-Zirren weniger Wasserdampf zur Verfügung. Für den Strahlungsantrieb der Kondensstreifen-Zirren (inklusive linearer Kondensstreifen) ergaben sich  $+38 \text{ mW/m}^2$ , die schwächer ausfallenden natürlichen Zirren haben ein  $RF$  von  $-7 \text{ mW/m}^2$ ; damit liegt der Gesamteffekt bei  $31 \text{ mW/m}^2$ , also ziemlich nahe an der Abschätzung von LEE et al. (2009). Mit einem semiempirischen Kondensstreifen-Zirren Modell unter Nutzung Satellitendaten berechnen SCHUMANN und GRAF (2013) einen etwas größeren Beitrag ( $+ 50 \text{ mW/m}^2$ ) als BURKHARDT und KÄRCHER (2011).

Neben den bislang betrachteten direkten Wolkeneffekten gibt es noch eine indirekte Wirkung auf die Wolken. Von Flugzeugen emittiertes Aerosol (zum Beispiel Ruß) oder sekundäres Aerosol (zum Beispiel  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) kann zum Wolken- oder Eiskondensationskern werden und so nicht nur zusätzliche Wolkenbildung anregen, sondern auch die mikrophysikalischen und optischen Eigenschaften von

Wolken beeinflussen. Damit wird nicht nur die Albedo der Wolken modifiziert, sondern auch die Lebensdauer der Wolken kann sich ändern (zum Beispiel HENDRICKS et al. 2011). Während der Effekt auf die niedrigen Wolken (Wasserwolken) eher ein kühlender ist, kann bei Zirren noch keine gesicherte Aussage hinsichtlich des Vorzeichens des zugehörigen Strahlungsantriebs getroffen werden. Kürzlich schätzen RIGHI et al. (2013) den aerosolbedingten Strahlungsantrieb (direkt und indirekt via Wasserwolken) mit  $-15 \text{ mW/m}^2$  ab, verbunden mit einer sehr großen Unsicherheit (Faktor 4).

### 3.6 Anteil am anthropogenen Strahlungsantrieb

Unter Einschluss der Wirkung von Kondensstreifen-Zirren, aber ohne die indirekten Wolkeneffekte und ohne den langsamen Ozonabbau infolge der Methanabnahme, ermittelten LEE et al. (2009), dass der gesamte Strahlungsantrieb im Jahr 2005 bei  $78 \text{ mW/m}^2$  lag (der unterste gestrichelte Balken in Abb. 10-3). Die neueren Ergebnisse von BURKHARDT und KÄRCHER (2011) bezüglich der Kondensstreifen-Zirren modifizieren diesen allenfalls marginal; der langsame Ozonabbau versucht vermutlich eine geringe Reduktion.

Den flugverkehrsbedingten Strahlungsantrieb verglichen LEE et al. (2009) mit dem gesamten anthropogenen Strahlungsantrieb. Im Jahr 2005 betrug letzterer  $1,6 \text{ W/m}^2$  (IPCC 2007); zufälligerweise ist das  $RF$  nur aufgrund aller anthropogenen  $\text{CO}_2$  etwa gleich groß. Das  $\text{CO}_2$  aus dem Flugverkehr ist für 1,6 % des gesamten anthropogenen Strahlungsantriebs verantwortlich (siehe auch Abb. 10-6), während sein Beitrag zu den heutigen anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen bei 2 bis 3 % liegt. Das ist eine

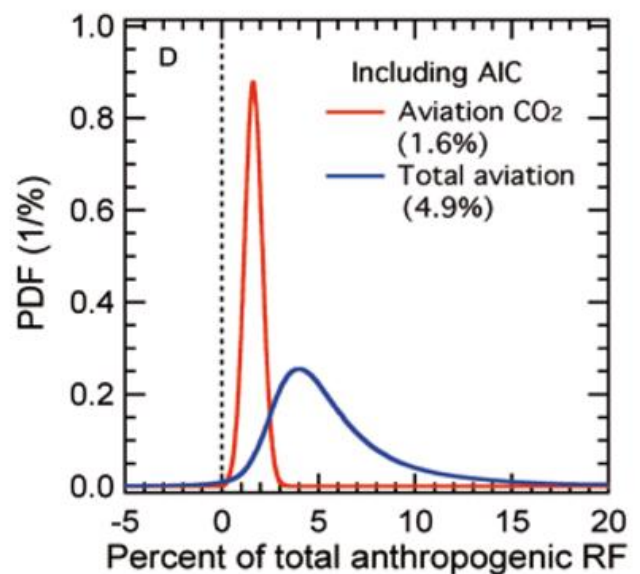


Abb. 10-6: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF = *probability density function*) des Beitrages des Luftverkehrs zum gesamten anthropogenen Strahlungsantrieb aufgrund nur des  $\text{CO}_2$  aus dem Luftverkehr (rot) und aufgrund aller Luftverkehrseffekte (blau). Die Zahlen in Klammern geben die jeweiligen Erwartungswerte an. Quelle: Fig. 6 aus LEE et al. (2009).

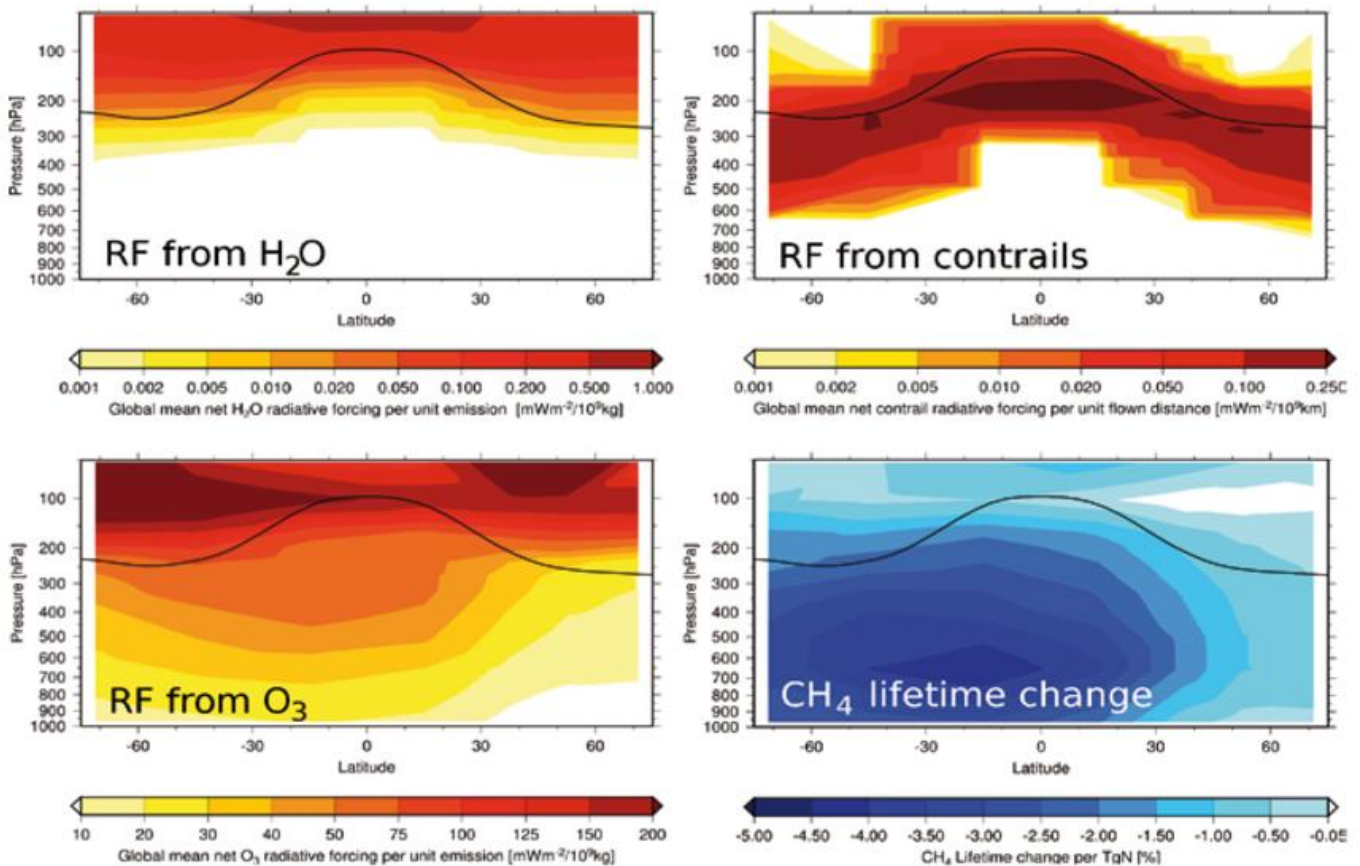


Abb. 10-7: Spezifische Strahlungsantriebe pro Einheitsemission als Funktion von Höhe und geographischer Breite der Emission für Wasserdampf (oben links), Kondensstreifen (oben rechts) und Ozon aus NO<sub>x</sub> (unten links) sowie Änderung der Lebensdauer von Methan aufgrund einer Einheitsemission von NO<sub>x</sub> (unten rechts). Quelle: Fig. 8.2, Fig. 8.4, Fig. 8.6 und Fig. 8.7 aus FICHTER (2009).

Folge davon, dass die meisten anthropogenen Emissionen langlebiger Treibhausgase über eine weitaus längere Zeit erfolgten, als das beim Luftverkehr der Fall ist, der erst in im letzten Drittel des vorherigen Jahrhunderts nennenswerte Emissionen hatte.

Der gesamte flugverkehrsbedingte Strahlungsantrieb (ohne die indirekten Wolkeneffekte und ohne den langsamen Ozonabbau infolge der Methanabnahme) hatte demnach einen Anteil von 4,9 % am gesamten anthropogenen *RF*, das heißt der gesamte Beitrag ist etwa dreimal so groß wie der Beitrag des CO<sub>2</sub>. Abb. 10-6 zeigt nicht nur die Mittelwerte für den Anteil des Flugverkehrs am anthropogenen *RF*, sondern auch die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen. Im Fall des CO<sub>2</sub>-Anteils ist diese sehr schmal, während die des gesamten flugverkehrsbedingten Strahlungsantriebs in Folge der größeren Unsicherheiten vergleichsweise breit ist.

#### 4 Minderung der Klimawirkung des Flugverkehrs

Der bislang rasch wachsende Beitrag des Flugverkehrs macht es angesichts des prognostizierten Wachstums des Transportvolumens erforderlich, den Beitrag des Luftverkehrs im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung zu mindern. Das kann auf verschiedenen Wegen erfolgen, die alle gleichzeitig beschränkt werden sollten:

- Reduktion der absoluten Emissionen durch geringere spezifische Emissionen (bessere Technologie, bessere Auslastung, das heißt höherer *Load-Factor*), durch Treibstoff optimierte Flugtrajektorien, durch Verwendung von alternativen Treibstoffen, durch geringere Reisefluggeschwindigkeiten und durch Reduktion des Transportvolumens (zum Beispiel durch Verringerung der Verkehrsnachfrage);
- Verringerung der Wirkung der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte durch veränderte Flughöhen oder durch ökoeffiziente Flugtrajektorien.

Während der erste Spiegelpunkt Disziplinen wie Flugzeugbau, Verkehrsforschung, Treibstoffchemie oder Verkehrsmanagement betrifft, ist für den zweiten ein erheblicher Beitrag der Meteorologie erforderlich.

#### 4.1 Ortsabhängigkeit der Klimawirkung

Während bei CO<sub>2</sub> die Wirkung unabhängig vom geographischen Ort, von der Höhe und dem Zeitpunkt der Emission ist, gilt das nicht für andere Emissionen des Flugverkehrs. 1998 zeigten SAUSEN et al. eine Höhen- und Ortsabhängigkeit des so genannten potentiellen Bedeckungsgrades von Kondensstreifen, also der Möglichkeit Kondensstreifen zu generieren. Damit verbunden war eine Änderung des Kondensstreifen-Bedeckungsgrades bei genereller Änderung der Flughöhe. FRÖMMING et al. (2012) untersuchten die Auswirkungen von vertikalen Verschie-

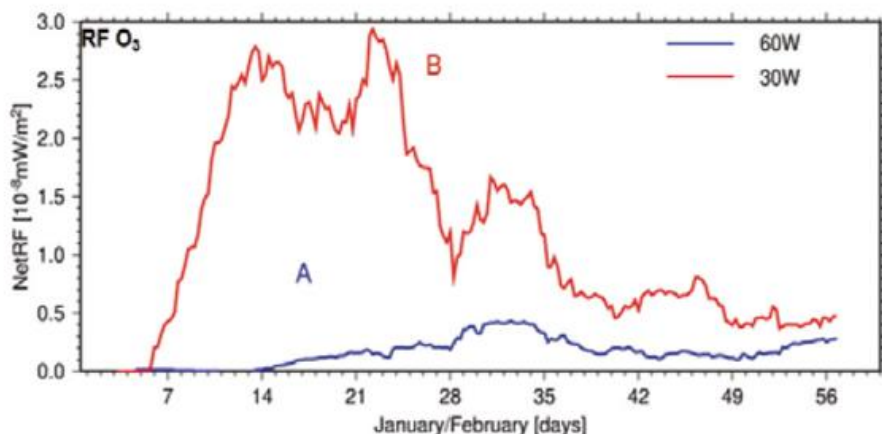


Abb. 10-8: Zeitlicher Verlauf des Strahlungsantriebs aufgrund einer Einheitsemission von NO<sub>x</sub> zum gleichen Zeitpunkt, in gleicher Höhe und gleicher geographischer Breite, aber in unterschiedlicher geographischer Länge (60°W und 30°W). Quelle: Fig. 44.5 aus MATTHES et al. (2012).

bungen aller Flugbewegungen auf die einzelnen Komponenten des luftverkehrsbedingten Strahlungsantriebs und auf die zugehörigen Temperaturänderungen. Bei allen Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekten nimmt die Klimawirkung mit abnehmender mittlerer Flughöhe ab; beim CO<sub>2</sub> ist es wegen des höheren Treibstoffverbrauchs in niedrigerer Flughöhe (bei konstanter Machzahl) umgekehrt. Insgesamt dominieren die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte; so verringert sich gemäß FRÖMMING et al. (2012) zum Beispiel der gesamte Strahlungsantrieb um knapp 30 %, wenn man im Mittel 4000 ft (circa 1240 m) niedriger fliegt. (Diesen Effekt könnte man sogar noch steigern, wenn man Flugzeuge für eine niedrigere Reiseflughöhe auslegte.)

In anderen Studien (GREWE und STENKE 2008, FICHTER 2009) wurden systematisch Einheitsemissionen längs eines Breitenkreises mit vorgegebener Höhe und geographischer Breite freigesetzt und das zugehörige *RF* bestimmt (Abb. 10-7). Beim *RF* vom H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> und von den Kondensstreifen ist eine deutliche Abhängigkeit von Höhe und Breite zu sehen. Ähnliches gilt für die Lebensdauer von CH<sub>4</sub> und damit auch für das zugehörige *RF*.

Die gesamte Variabilität ist weitaus größer als in den oben genannten Studien abgeschätzt. Der Strahlungsantrieb der Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte hängt nicht nur zusätzlich von der geographischen Länge ab, sondern auch von der Tages- und Jahreszeit der Emission und der dann herrschenden Wetterlage (und damit deren Entwicklung), wie folgende Beispiele zeigen:

1. Die Gebiete, in den sich Kondensstreifen bilden können, haben häufig nur eine geringe vertikale Erstreckung (wenige hundert Meter, siehe zum Beispiel MANNSTEIN et al. 2005).
2. Zwei gleich große NO<sub>x</sub>-Emission, die zu identischen Zeitpunkt, identischer Höhe und identischer geographischer Breite, aber mit 30° Unterschied in der geographischen Länge über dem Nordatlantik in Luftpakete freigesetzt werden, führen zu völlig unterschiedlichen zeitlichen Verläufen der zugehörigen *RF* (MATTHES et al. 2012, siehe auch Abb. 10-8), da eines der Luft-

pakete in die Tropen transportiert wird, während das andere in mittleren Breiten bleibt.

#### 4.2 Planung von ökoeffizienten Flugtrajektorien

Die Tatsache, dass die Klimawirkung einer Nicht-CO<sub>2</sub>-Emission des Flugverkehrs sehr stark von Ort, Höhe, Zeitpunkt und Wetterlage abhängt, kann man sich zu Nutze machen, um die Klimawirkung des Luftverkehrs zu minimieren. Vor knapp zwei Jahrzehnten schlugen SAUSEN et al. (1994) vor, eine orts-, höhen- und zeitabhängige Kostenfunktion zu bestimmen, die für jeden Raum-Zeit-Punkt angibt, wie eine Einheitsemission auf

das Klima wirkt. Gewichtet mit den spezifischen Emissionen pro Zeiteinheit oder pro Längeneinheit eines Fluges kann dann die Klimawirkung dieses Fluges durch ein Wegintegral über die Flugtrajektorie bestimmt werden. Die minimale Klimawirkung erhält man schließlich durch Variation der Flugtrajektorie, so dass das Integral ein Minimum erzielt.

Dieses Verfahren ist analog zur Bestimmung operationeller Flugtrajektorien, als Kostenfunktion verwendet man hier jedoch Flugzeit, Treibstoffverbrauch oder Betriebskosten. In der Regel geht eine Reduzierung der Klimawirkung mit einer Erhöhung der Betriebskosten einher. Wenn man die gesamten Klimakosten mittels geeigneter Gewichtungsfaktoren gewichtet, wie das zum Beispiel beim Emissionshandel der Fall ist, kann man die Klimakosten zu den Betriebskosten addieren und dann den optimalen Weg über die gemeinsamen Klimakosten und Betriebskosten ermitteln.

#### 5 Schlusswort

Wir haben gesehen, dass der Flugverkehr auf besondere Weise zur Klimaerwärmung beiträgt. Beim Flugverkehr sind neben den CO<sub>2</sub>-Emissionen die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte im Vergleich zu anderen anthropogenen Quellen von verhältnismäßig großer Bedeutung. Gemessen als Strahlungsantrieb sind die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte etwa doppelt so wirksam wie die CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>6</sup>.

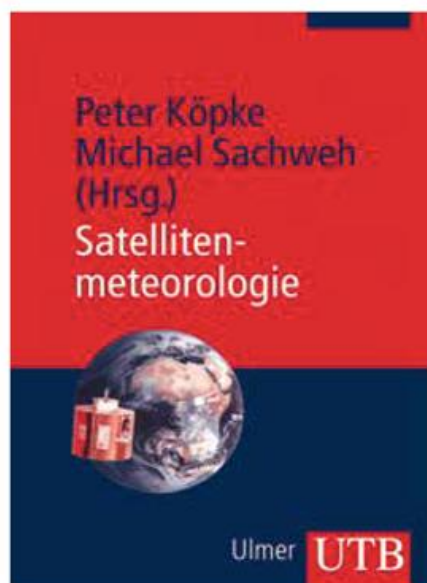
Durch ökoeffiziente Flugtrajektorien bietet sich die Möglichkeit, die Klimawirkung des Flugverkehrs bei gleichem Transportvolumen deutlich zu mindern. Auch wenn noch erhebliche Forschungsaktivitäten erforderlich sind, um die den ökoeffizienten Flugtrajektorien zugrunde liegenden Kostenfunktionen hinreichend genau zu berechnen, sollte man dennoch bereits heute mit der Planung der Umsetzung beginnen. Selbst bei ungenau bekannten Kostenfunktionen ist bereits eine Minderung der Klimaerwärmung möglich.

<sup>6</sup> Diese relativen Gewichte verschieben sich, wenn man andere Metriken anstatt des Strahlungsantriebs verwendet.

## Literatur

- BURKHARDT, U., B. KÄRCHER, 2011: Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature Climate Change* **1**, 4-58, doi 10.1038/NCLIMATE1068.
- FICHTER, C., 2009: Climate impact of air traffic emissions in dependency of the emission location and altitude. Dissertation. *DLR-Forschungsbericht* DLR-FB--2009-22, 152 S.
- FRÖMMING, C., M. PONATER, K. DAHLMANN, V. GREWE, D.S. LEE, R. SAUSEN, 2012: Aviation-induced radiative forcing and surface temperature change in dependency of the emission altitude. *Journal of Geophysical Research* **117** (D19104), doi 10.1029/2012JD018204.
- GREWE, V., A. STENKE, 2008: AirClim: an efficient tool for climate evaluation of aircraft technology, *Atmos. Chem. Phys.* **8**, 4621-4639.
- HENDRICKS, J., B. KÄRCHER, U. LOHMANN, U., 2011: Effects of ice nuclei on cirrus clouds in a global climate model. *J. Geophys. Res.* **116** (D18206), 1-24, doi 10.1029/2010JD015302.
- HOOR, P., J. BORKEN-KLEEFELD, D. CARO, O. DESSENS, O. ENDRESEN, M. GAUSS, V. GREWE, D. HAUGLUSTAINE, I.S.A., ISAKSEN, P. JÖCKEL, J. LELIEVELD, G. MYHRE, E. MEIJER, D. OLIVIE, M. PRATHER, C. SCHNADT POBERAJ, K.P. SHINE, J. STAEHELIN, Q. TANG, J. VAN AARDENNE, P. VAN VELTHOVEN, R. SAUSEN, 2009: The impact of traffic emissions on atmospheric ozone and OH: results from QUANTIFY. *Atmos. Chem. Phys.* **9**, 3113-3136.
- IPCC, 1996: Climate change 1995 – The science of climate change. In: J.T. HOUGHTON, L.G. MEIRA FILHO, B.A. CALLANDER, N. HARRIS, A. KATTENBERG K. MASKELL (Eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, Cambridge, UK.
- IPCC, 1999: Aviation and the global atmosphere. In: J.E. PENNER, D. H. LISTER., D.J. GRIGGS, D.J. DOKKEN, M. MCFARLAND (Eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, Cambridge, UK.
- IPCC, 2007: Climate change 2007. The physical science basis. In: S. SOLOMON, D. QIN, M. MANNING, M., MARQUIS, K. AVERYT, M.M.B. TIGNOR, H.L. MILLER, Z. CHEN (Eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, UK.
- LEE, D.S., D.W. FAHEY, P.M. FORSTER, P.J. NEWTON, R.C.N. WIT, L.L. LIM, B. OWEN, R. SAUSEN, 2009: Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmos. Environ.* **43**, 3520-3537.
- MANNSTEIN, H., P. SPICHTINGER, K. GIERENS, 2005: A Note on How to Avoid Contrail Cirrus. *Transportation Research* **10**, 421-426.
- MATTHES, S., U. SCHUMANN, V. GREWE, C. FRÖMMING, K. DAHLMANN, A. KOCH, H. MANNSTEIN, 2012: Climate optimized air transport. In U. SCHUMANN (Hrsg.): *Atmospheric Physics: Background – Methods – Trends*. Springer, Heidelberg, doi 10.1007/978-3-642-30183-4, 727-746.
- PONATER, M., S. DIETMÜLLER, R. SAUSEN, 2012: Greenhouse effect, radiative forcing and climate sensitivity. In U. SCHUMANN (Hrsg.): *Atmospheric Physics: Background – Methods – Trends*. Springer, Heidelberg, doi 10.1007/978-3-642-30183-4, 85-100.
- RIGHI, M., J. HENDRICKS, R. SAUSEN, 2013: The global impact of the transport sectors on atmospheric aerosol: simulations for year 2000 emissions. *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 9939-9970, doi 10.5194/acp-13-9939-2013.
- SAUSEN, R., D. NODORP, C. LAND, 1994: Towards an optimal flight routing with respect to minimal environmental impact. In U. SCHUMANN, D. WURZEL (eds.): *Impact of Emissions from Aircraft and Spacecraft upon the Atmosphere*. Proceedings of an International Scientific Colloquium, Köln, Germany, April 18-20, 1994. *DLR Mitteilung* **94-06**, Oberpfaffenhofen und Köln, 473-478.
- SAUSEN, R., K. GIERENS, M. PONATER, U. SCHUMANN, 1998: A diagnostic study of the global distribution of contrails: Part I. Present day climate. *Theor. Appl. Climatol.* **61**, 127-141.
- SAUSEN, R., U. SCHUMANN, 2000: Estimates of the climate response to aircraft CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions scenarios. *Climatic Change* **44**, 27-58.
- SAUSEN, R., 2004: Luftverkehr und Klima. *promet* **30**, 181-187.
- SAUSEN, R., I. ISAKSEN, V. GREWE, D. HAUGLUSTAINE, D.S. LEE, G. MYHRE, M.O. KÖHLER, G. PITARI, U. SCHUMANN, F. STORDAL, C. ZEREFOS, 2005: Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999). *Meteorol. Z.* **14**, 555-561.
- SAUSEN, R., K. GIERENS, V. EYRING, J. HENDRICKS, M. RIGHI, 2012: Climate impact of transport. In U. SCHUMANN (Hrsg.): *Atmospheric Physics: Background – Methods – Trends*. Springer, Heidelberg, doi 10.1007/978-3-642-30183-4, 711-725.
- SCHUMANN, U., 1996: On conditions for contrail formation from aircraft exhausts. *Meteorol. Z.* **5**, 4-23.
- SCHUMANN, U., K. GRAF, 2013: Aviation-induced cirrus and radiation changes at diurnal timescales. *J. Geophys. Res. Atmos.* **118**, 2404-2421, doi 10.1002/jgrd.50184.
- UNGER, N., 2011: Global climate impact of civil aviation for standard and desulfurized jet fuel. *Geophys. Res. Lett.* **38**, L20803, doi 10.1029/2011GL049289.

## Buchbesprechung



PETER KÖPKE, MICHAEL SACHWEH (HRSG.), 2012: *Satellitenmeteorologie*. UTB, 413 Seiten, 39.99 Euro, ISBN 978-3825235253.

Das Buch „Satellitenmeteorologie“ von Peter Köpke und Michael Sachweh richtet sich gleichermaßen an Studierende der Meteorologie und verwandte Wissenschaften mit Bezug zur Fernerkundung, wie interessierte Laien und Fachleute, die sich außerhalb ihres Spezialgebiets über Fernerkundungsmethoden informieren möchten.

Die Technik der Satellitenfernerkundung reicht zurück bis in die 70-er Jahre des letzten Jahrhunderts. Viele tausend Artikel und Aufsätze sind über die Thematik geschrieben worden, selten jedoch haben sich Autoren so intensiv und erfolgreich bemüht, ein Standardwerk und einen fundierten Überblick über die Satellitenfernerkundung zu schaffen, und dies auch noch in deutscher Sprache. Die Art und Weise wie die Autoren die Thematik beschreiben und den Leser führen und begleiten ist beispielhaft und ermöglicht auch Laien den einfachen Einstieg in die Materie. Dies gilt in besonderem Maße für die ersten Kapitel, die in die physikalischen Grundlagen der meteorologischen Fernerkundung einführen und in dieser Hinsicht die größte He-

erausforderung darstellen. Gleichwohl wird ein gewisses Maß an mathematischen und physikalischen Kenntnissen vorausgesetzt, so dass nie der Eindruck eines pseudo-wissenschaftlichen Werks entsteht.

Das Buch ist reich bebildert, wobei die gezeigten Grafiken sehr ansehenswert sind und dem Leser eine wirkliche Hilfe bieten. Allen Kapiteln ist gemein, dass zu anfangs eine kurze Einführung in die Thematik geboten wird, gefolgt von den angewandten Methoden zur Fernerkundung der jeweils diskutierten Größen. Zusätzlich werden in einer Randspalte immer wieder weiterführende Hinweise und anschauliche Erklärungen geliefert, die das Verständnis weiter fördern. Das Buch ist dergestalt aufgebaut, dass es den Leser anhand eines roten Fadens von den Grundlagen über die Fernerkundungsmethoden zu den physikalischen Größen im Einzelnen führt. Auch Quereinsteigern mit Vorwissen ist es jederzeit möglich, sich zu einzelnen Themen einen Überblick zu verschaffen, ohne zwingend vorausgegangene Kapitel gelesen haben zu müssen. Das Buch ist hinsichtlich aktueller Fernerkundungssensoren auf dem Stand des Jahres 2012 und am Ende wird auch ein Ausblick auf zukünftige Systeme gegeben.

Die Autoren geben anfangs einen generellen Überblick über die Art und Weise, wie aus Satellitenmessungen physikalische Größen abgeleitet werden. Dies umfasst auch eine offene Diskussion der Vor- und Nachteile der Technologie und bringt dem Leser die Notwendigkeit von Kalibration und Validation nahe. Das daran anschließende Kapitel über die physikalischen Grundlagen relevanter Größen wie Strahlungseigenschaften, Streu- und Absorptionsprozesse in der Atmosphäre, Reflexionsprozesse am Boden, sowie aktive und passive Fernerkundungssysteme bereitet den Boden für das grundlegende Verständnis der in folgenden Kapiteln im Detail beschriebenen Fernerkundungsverfahren und

deren Ergebnisse. Es folgt eine umfassende Diskussion des Strahlungstransfers von der Quelle über den Boden zum Satellitensensor und der dazu nötigen physikalischen Größen. Häufig wird in anderen Werken zur Fernerkundung das Thema „Messgeometrie und Orbits“ eher stiefmütterlich behandelt oder fällt dem Rotstift des Lektors zum Opfer, nicht jedoch in diesem Beitrag. Mit gutem Grund gehen die Autoren auf die typischen Beobachtungsszenarien ein und zeigen exemplarisch, wie etwa die gewählte Bahngeometrie die Messungen beeinflusst und wie durch die Kombination verschiedener Satellitenkanäle ein Mehrwert erzielt werden kann.

Die nun folgenden Kapitel befassen sich mit einzelnen physikalischen Größen und Phänomenen, die mit Hilfe von Fernerkundungsverfahren bestimmt werden können. Dies sind die klassischen meteorologischen Größen wie Temperatur, Bewölkung und Niederschlag sowie der Wind. Die darauffolgenden Abschnitte widmen sich Spezialthemen wie beispielsweise der Aerosol- und Spurengasfernerkundung und den Besonderheiten der Landoberflächen- und Meeresoberflächenfernerkundung bei Schnee- und Eisbedeckung. Ein weiteres Kapitel widmet sich intensiv dem Thema „Strahlung“ womit auch eine Diskussion der Strahlungsbilanz des Systems Erde-Atmosphäre verbunden ist. Etwas in der Luft hängt das abschließende Kapitel über meteorologische Satelliten und Sensoren, welches man zunächst eher am Anfang des Buches nach der einleitenden Diskussion über die Fernerkundungsmethodik (Kapitel 4) vermuten würde. Der Standort am Ende des Buches hat allerdings den Vorteil, dass der Leser dann bereits mit den per Fernerkundung bestimmten Größen und den angewandten Methoden vertraut ist. Hier schließt sich auch eine umfangreiche tabellarische Sammlung aktueller Sensoren an, mit Angaben zum Missionsziel, zum Orbit, zur Plattform, und der erwarteten Lebensdauer der Mission.

Das Literaturverzeichnis enthält die wichtigsten Werke, wobei jedoch eine gewisse Neigung mancher Autoren zum Selbstzitiere unübersehbar ist. Die Zusammenfassung von zum Thema gehörigen Internetseiten wird sicherlich mit zunehmendem Alter des Buches an Aktualität verlieren. Hier könnte eine über den Verlag oder auch den Autoren gepflegte Webseite zum Buch in der Zukunft weiterhelfen. Die Akronymsammlung am Ende wird dem Fachmann im Dschungel der im Satellitenbereich sehr häufig verwendeten Abkürzungen an mancher Stelle

nutzen, dem Laien jedoch bietet sie die erste Anlaufstelle bei unbekanntem Missionen, Methoden, Organisationen usw.

Bleibt als kleine Kritik anzumerken, dass manchen Kapiteln die Herkunft ihrer jeweiligen Autoren sehr deutlich anzumerken ist. An einigen Stellen würde man sich eine etwas offener und allgemeiner gehaltene Diskussion erwarten. Dies trifft vor allem auf die Kapitel mit den Beschreibungen zu einzelnen Messgrößen zu. Der unkundige Leser gewinnt hier womöglich

den Eindruck, dass ein Thema damit umfassend beschrieben wäre, während der Spezialist sich über fehlende Aspekte wundert, die offensichtlich nicht zum Spezialgebiet der Autoren gehören. Dennoch erfüllt das Buch seinen eingangs erwähnten Zweck eines umfassenden und aktuellen Standardwerks zur Satellitenmeteorologie und kann uneingeschränkt als Fachlektüre und auch als Nachschlagewerk empfohlen werden.

Werner Thomas

## Examina im Jahr 2011

### Habilitationen, Dissertationen, Master-, Diplom- und Bachelorarbeiten in der Meteorologie und verwandten Fächern aus dem deutschsprachigen Raum

---

#### Universität Bayreuth

---

##### Dissertation

SIEBICKE, Lukas: Advection at a forest site - an updated approach.

##### Masterarbeiten

LEIPOLD, Thomas: Carbon dioxide exchange above Kobresia meadows.

LÜDTKE, Nicole: Verhältnis stabiler Kohlenstoffisotope im sekundären organischen Aerosol: Smogkammerexperimente.

PFAB, Daniela: Wasserdampfkonzentrationsmessungen in großen Höhen und bei niedrigen Temperaturen.

THIEM, Elisabeth: Modeling of the energy exchange above lake and land surfaces.

##### Diplomarbeiten

WAGNER, Martin: Tägliche Variabilität des turbulenten Wärmestromes über nasser und trockener Tundra im Sommer in einem typischen Footprint-Gebiet auf Svalbard.

##### Bachelorarbeiten

BERBERICH, Christopher: Charakterisierung der Partikelneubildung im Fichtelgebirge im Frühsommer.

KIEB, Susanne: Rezente Klimaveränderung im Fichtelgebirge (Oberfranken) und ihre Auswirkungen auf das Wachstum der Fichte.

WISSMÜLLER, Katharina: Arktische Aerosole aus marinen Biopolymeren – Erste Smogkammerexperimente.

---

#### Freie Universität Berlin

---

##### Dissertationen

KREMSER, Stefanie: Improved understanding of polar ozone chemistry and the future of the Antarctic ozone hole.

KUBIN, Anne: A model study on the influence of the 11-year solar cycle on the atmosphere.

RENGGLI, Dominik: Seasonal predictability of wintertime windstorm climate over the North Atlantic and Europe.

SCHIMANKE, Semjon: Plötzliche Stratosphärenenerwärmungen: langfristige Variabilität sowie zukünftige Trends.

SCHÖN, Nana: Combining satellite altimetry and GPS-corrected tide gauge data for the reconstruction of sea level anomalies.

SELZ, Tobias: Der Dynamische Zustandindex – Berechnung aus Reanalysedaten und Anwendung auf das El Niño-Phänomen.

STENGEL, Martin: The assimilation of infrared satellite radiances into a limited-area NWP model.

##### Diplomarbeiten

BERGEMANN, Martin: Vegetationssimulation für das letzte Interglazial mit Hilfe des BIOME I-Modells und zweier AGCM's: ein Parametrisierungsansatz und ein Daten-Modellvergleich für Nordasien.

CURIO, Julia: Vergleich zweier regionaler Klimasimulationen über Afrika, angetrieben mit verschiedenen globalen Klimamodellen.

RASCH, Fabian: Verkehrsbedingte Effekte auf die Feinstaubbelastung (Partikel-Größenverteilung fein/grob, PM10-Masse, Rußmasse) in der Stadt Leipzig (Analyse von städtischem Fein- und Ultrafeinstaub im Vorfeld der Einführung der Umweltzone Leipzig).

##### Bachelorarbeiten

ARNDT, Stefanie: Variabilität und Trends des Wasserdampfgehalts in der tropischen Stratosphäre.

BABIAN, Stella: Analyse des klimatologisch bedingten Wachstums an Kiefern in Berlin und Potsdam.

BÖTTCHER, Christopher: Vergleich von atmosphärischen Aerosol und Wasserdampf aus Satelliten- und Bodenmessungen.

CRASEMANN, Berit: Vergleichende Untersuchung von Winterstürmen im EZMW-EPS und Reanalysen.

BEN TALEB, Tarik: Der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Zirkulationsklasse (CWT) in Marokko.

DEETZ, Konrad: Der Tschadsee – Änderung der Niederschlagsintensität im

Eem und eine Sensitivitätsstudie zum „Eem-Megatschadsee“.

HEIDERMANN, Jörg: Analyse von Tropfenspektren aus hochaufgelösten Niederschlagsmessungen mit einem Distrometer.

KIST, René: Die multidekadische Oszillation im Nordatlantik und ihre Auswirkung auf das Wetter in Europa.

KLÖTZKE, Thomas: Signaturen von Gewitterzugbahnen in SYNOP-Beobachtungen.

LANGER, Tina: Untersuchung zum aktuellen und potentiell zukünftigen Waldbrandrisiko in Deutschland.

NIESEL, Andrea: Analyse von mikroskaligen Temperatur- und Feuchtefeldern im Modell Envimet am Beispiel eines Strahlungstages.

PASTERNAK, Alexander: Identifikation von unterschiedlichen Eigenschaften zwischen Stürmen in West- und Osteuropa.

RENKL, Christoph: Untersuchung der Vorhersagbarkeit europäischer Winterstürme in den Ensemble-Vorhersagen des EZMW in Abhängigkeit von der Vorlaufzeit.

RICHLING, Andy: Untersuchung von Intensivierungsfaktoren explosiver Zyklogen im Raum des Ionischen Meeres.

ROMANOWSKY, Erik: Entwicklung der stratosphärischen Temperatur unter verschiedenen Treibhausgas-Szenarien im 21. Jahrhundert.

SAKUTH, Olaf: Objektive Identifikation des schadenträchtigen Windfeldes tropischer Zyklonen.

SCHUMACHER, Nick: Zeitreihenanalyse der aus MERIS-Daten ermittelten Wolkenhöhen (2003-2009).

SIELAND, Julia: Parameterbasierte Konstruktion eines Mustergewitters für die Station Berlin-Tempelhof.

STEIKERT, Ralf: Validierung der AATSR/MERIS-Wolkenmaske durch bodengestützte Wolkenmessungen.

TORNOW, Florian: Einfluss von Aerosol auf die Hadley-Zirkulation in Abhängigkeit von der vertikalen Auflösung des Klimamodells.

TRADOWSKY, Jordis: Untersuchung von zusammenhängenden Niederschlags-

ereignissen anhand hochaufgelöster Messungen.

VOIGT, Maximilian: Vergleich der gemessenen Wolkenhöhen aus einem aktiven Instrument (Calipso) und einem passiven Instrument (Modis).

VOLLACK, Ken: Untersuchung der Bewölkung auf meteorologische Parameter mit dem mikroskaligen Programm Envimet.

WALTHER, Sophia: Zusammenhang zwischen der Stratosphärenenerwärmung im Januar 2009 und der Tageslänge.

WARNKE, Bianka: Systematische Fehlerquellen der Temperaturmessung mit Radiosonden.

---

#### Universität Bonn

##### *Dissertationen*

SCHOMBURG, Annika: Improving the simulation of small-scale variability in radiation and land-surface parameterizations in a mesoscale numerical weather prediction model.

##### *Diplomarbeiten*

HERGERTEN, Markus: Polartiefs im Nordmeer mit Analyse des warmen Kerns.

KÖBLER, Ann: Eifelöhn – Simulation und Modellierung von Föhnwinden in der Eifel.

LAPP, Kerstin: Multi-Modell Analyse zur Klimaänderung der Nordatlantischen Oszillation.

MERTENS, Lauren: Feinstaubausbreitung simuliert mit dem COSMO-Modell.

RIENERMANN, Jens: Tropische Wirbelstürme und deren Außertropische Umwandlung.

SCHRÖER, Jan-Bernd: Spatial and temporal variability of raindrop size distribution – Analysis and impact on spaceborne radar observations.

STOLZENBERGER, Sophie: Untersuchungen zu botanischen Paläoklimatransferfunktionen.

ÜBEL, Markus: Konvergenzlinien mit Konvektion im Warmluftbereich.

WOSNITZA, Christoph: Inverse Modellierung von Energiebilanzen und -flüssen.

ZERENNER, Tanja: Netzwerkanalyse an Klimadaten.

##### *Bachelorarbeiten*

BACH, Liselotte: Die thermohaline Zirkulation – Zeitreihenanalyse eines stochastischen Systems.

ESSER, Sven: Eine numerische Untersu-

chung von Aerosoltransport aus der Grenzschicht in die freie Atmosphäre mit dem COSMO-Modell.

FLICK, Bentje: Einbindung der Messung von Radiosonden und eines Mikrowellen-Profilers in PAFOG.

FRERKES, Michael: Blocking im Frühjahr 2011.

FRIELINGS DORF, Barbara: Hydrologische Analyse des Wachtberger Unwetters vom 3. Juli 2010 mit dem Community Land Model.

HARTUNG, Kerstin: Blocking und Orographie – Eine Untersuchung mit PUMA.

HÖSCHEN, Heidrun: Schneemessungen mit dem MRR.

KURZROCK, Frederik: Objektive Analyse von Gewitterzugbahnen.

STOCKHAUSEN, Benedikt: Synoptische Vorhersage der Temperaturamplitude im Tagesverlauf, sowie Minimal- und Maximaltemperatur.

ZIEGERT, Michael: Vergleich von Niederschlagsmessungen am Boden mit Radarmessungen.

---

#### Universität Bremen

##### *Dissertationen*

MESSERSCHMIDT, Janina: Ground-based remote sensing of atmospheric carbon dioxide with Fourier transform spectroscopy.

RIDDER, Theo: The Western Pacific: Sources of air pollution and its impact on troposphere to stratosphere transport.

WIEBE, Heidrun: Implementation and validation of the snow grain size retrieval SGSP from spectral reflectances of the satellite sensor MODIS.

##### *Diplomarbeit*

HUNTEMANN, Marcus: Comparison and Improvement of Cloud Liquid Water Retrieval from Satellite Observations over Sea Ice.

##### *Bachelorarbeit*

BARKAT, Ahmed: Upgradation of an existing optical FTIR spectrometer to measure local conditions by using a White cell.

---

#### Universität Dresden

##### *Diplomarbeiten*

BÄUME, Franziska: E-Learning within the framework of Water Management

and – Engineering.

BOUILLON, Christian: Modellierung des Wasserdargebots eines Teileinzugsgebiets des Westlichen Bugs, Ukraine.

HELD, Franz: Einfluss variabler Grünraumstrukturen auf das urbane Klima der Stadt Leipzig, Simulationen mit dem 3D-Mikroklimamodell ENVI-met.

LISNJAK, Dmitrij: Weiterentwicklung und Parametrisierung eines Kaskadenmodells zur zeitlichen Disaggregation von Niederschlagszeitreihen mit Tagessummen.

LOHMANN, Gerald Magnus: Cloud Phase Classification Using Multiple Ground Based Sensors.

MEHLER, Susann: Untersuchung der gegenwärtigen und Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der thermischen und bioklimatischen Bedingungen an exemplarisch ausgewählten Klimastationen im Stadtgebiet von Dresden.

THIEME, Susann: Untersuchungen zur Unsicherheit in projizierten Extremwertstatistiken für den Niederschlag im Freistaat Sachsen.

TÖNNIES, Anne: Zeitliche Disaggregation von Niederschlagszeitreihen zur Anwendung auf Messdaten und Klimamodellausgaben.

WIEDL, Denise: Untersuchungen zur Unsicherheit in Extremwertstatistiken für den Niederschlag auf der Basis gemessener und simulierter Zeitreihen im Freistaat Sachsen.

WOLF, Matthias: Vergleich von ausgewählten Phänomenen mit dem Xylemsaftflussverhalten und Ökosystemaustausch von Beständen im Tharandter Wald.

##### *Bachelorarbeiten*

RICHTER, Undine: Abschätzung potentieller Effekte des Klimawandels für unterschiedliche Bestockungsszenarien am Beispiel des Wernersbacheinzugsgebiets.

SCHÄFER, Christiane: Abschätzung mittlerer Wasserhaushaltsgrößen vor dem Hintergrund eines potentiellen Klimawandels in Sachsen.

---

#### Universität Frankfurt

##### *Dissertationen*

BRINCKMANN, Sven: Short-Lived Brominated Gases: Observations from Source Regions to the stratosphere.

DOBLER, Andreas: Downscaling of ge-

neral circulation models in two alpine regions: The European Alps and the Himalayas.

KLEIN, Holger: Variabilität der Eiskeimkonzentration über Zentraleuropa.

*Diplomarbeit*

ICKES, Luisa: Modellierung von Nukleationsprozessen für das Schwefelsäure-Wasser-System in der CLOUD-Kammer.

*Bachelorarbeiten*

DITTMANN, Anna Waldemission von Monoterpenen während der Frühjahrs-erholung („spring recovery“) und Frühjahrs-wachstum am kleinen Feldberg.

HEPPELMANN, Tobias: Wellenregime im rotierenden Annulus.

---

Technische Universität  
Bergakademie Freiberg

---

*Diplomarbeiten*

SCHÜTTAUF, S.: Die chemische Zusam-mensetzung von Nebel- und Wolken-wässern im Erzgebirge.

WEIßBACH, S.: Saisonaler Eintrag von Spurenstoffen in das grönländische Eis und deren Auswirkung auf die Ver-dichtung von Firn: Fallstudie an einem ausgewählten Firnkernstück aus Nord-grönland.

*Bachelorarbeiten*

FIEDLER, B.: Der Effekt von blitzindu-zierter NO<sub>x</sub>-Produktion auf bodennah-es Ozon und die Bedeutung für den Kli-mawandel.

KABOTH, S.: Untersuchung dekadischer Variationen der Globalstrahlung („global dimming“ / „global brightening“ in Deutschland vom Beginn des 20. Jahr-hunderts bis zum Jahr 2005.

KLOPPE, N.: Klassifizierung des Himmels-zustands auf Basis von Strahlungsdaten

LEHMANN, S.: Gegenwärtige und zu-künftige Änderungen der bodennahen Luftfeuchte Sachsens.

SEIDLER, A.: Adaptation of polar diatoms to elevated salinity and low temperatu-res.

---

Universität Freiburg

---

*Dissertation*

ZYGMUNTOWSKI, Markus, 2011: Ana-lysis of turbulent CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes over an Alsatian wheat field.

*Masterarbeit*

COSTELLO, Joanna, 2011: Quantifying the effects of the varying solar spectrum on photovoltaic technologies, specific to Freiburg im Breisgau.

*Bachelorarbeit*

GEBHARDT, Sven: Evaluation of PET-ref for 4 meteorological stations in central Macedonia, Greece.

---

Universität Göttingen

---

*Dissertationen*

FON, Lawrence: Magentotellurics and Geomagnetic Depth sounding in Queensland, South Eastern Australia - Evidence for the Tasman Line?

TANRIVERDI, Vedat: Numerical simu-lations of the gravitational geodynamo and its time spectrum.

Teil Geophysik

*Diplomarbeiten*

AL-HALBOUNI, Djamil: Elektromagne-tische Tiefenforschung in den westeu-ropäischen Alpen: Die Unterbrechung elektrisch hochleitfähiger Strukturen der Erdkruste und des Erdmantels durch die alpine Gebirgskette.

BRADEN, Jelka: Der Einfluss von Rand-schichten und Rotation auf die Eigen-moden doppelt diffusiver Systeme.

CLAUSEN, Niels: Inertialwellen im diffe-rentiell rotierenden Kugelspalt.

OBERDORFER, Phillip: Numerische Si-mulation differentiell getriebener Kon-vektion in rotierenden Sphären.

PETKOWSKI, Dimitrij: Verhalten magne-totaktischer Bakterien.

Teil Bioklimatologie

*Masterarbeit*

HARRIS Mabel A.: Patterns of spatial and temporal variability of tree-ring growth in Southern Chile and their relationship with climate.

*Bachelorarbeiten*

BÖSCH, Tim: Eingrenzung der elekt-rischen Leitfähigkeitsanomalie des Nördlinger Ries und Test der Hypothe-se eines Leitfähigkeitsgradientens in Deutschland mit der Magnetotellurik.

FORYS, Gregor: Die statistische Auswer-tung der tellurischen Verzerrung an 135 Stationen in Deutschland.

HANNINK, Julius: Stabile finite Differen-zen-Schemata für konvektive Flüsse.

SCHULZE, Kirsten: Eingrenzung der Leitfähigkeitstheorie des Nördlinger Ries durch geomagnetische Tiefenson-dierung.

---

Universität Hamburg

---

*Dissertationen*

BASTIGKEIT, Ilona: Erzeugung von Va-lidierungsdaten für wirbelaflösende mokriskalige Strömungs- und Ausbrei-tungsmodelle.

FISCHER, Rasmus: Entwicklung eines problemorientierten Software-Paketes zur automatisierten Aufbereitung, Ana-lyse und Dokumentation von im Wind-kanal produzierten Daten zur LES-Val-idierung.

HALLER, Michael: Arktische Zyklonen und Meereisdrift während der DAMO-CLES-Bojenexperimente 2007-2010.

KRIEGSMANN, Arne: Einfluss von Zyklonen auf das Meereis in der zentralen Arktis: Modellstudien und Beobachtun-gen.

PEECK, Christine: Einfluss urbaner Rau-igkeitsstrukturen auf das bodennahe Windfeld der Stadt Hamburg.

PETERS, Karsten: Ship emission influence on clouds in satellite and model data.

RIEMANN-CAMPE, Kathrin: Can con-vective precipitation variability be de-duced from the variability in CAPE and CIN?: An analysis of global CAPE and CIN variability in present and fu-ture climates.

*Masterarbeiten*

ANSORGE, Cedrick: DNS of the Turbu-lent Ekman Layer.

DÖRENKÄMPER, Martin: Design, de-velopment and testing of a methodolo-gy to model wind turbines layer wind tunnels.

JUNK, Constantin: Testing tropical dy-namics in an icosahedral hydrostatic atmosphere model using idealized ex-periments.

NAUMANN, Ann Kristin: Physikalische Prozesse der Meereisentwicklung in of-fenem Wasser.

SCHMIDT, Richard: Schneelast an Strom-leitungen: Heute und in Zukunft.

SCHRÖN, Anne: Wind Tunnel Measure-ments of Living Tree Branches.

TETZLAFF, Amelie: Investigation of the influence of sea ice concentration on boundary layer temperatures using a simple heat flux model.

- TIMM, Nele: Oceanic influence on precipitation in Venezuela, under current and future climate.
- Diplomarbeiten*
- BITTNER, Matthias: Auswirkungen von tropischen Vulkanausbrüchen auf den nordatlantischen Raum in den letzten 1.200 Jahren.
- BRÖHAN, David: Estimation of Arctic Ocean surface currents and sea ice thickness.
- CALLIES, Jörn: A Two-Plane Model of the Meridional Overturning Circulation with Boundary Mixing.
- EGGERT, Bastian: Auswirkungen der Oberflächeneigenschaften in REMO auf die Simulation der unteren Atmosphäre.
- ERTL, Georg: Charakteristika und Repräsentativität von Niederschlag in Norddeutschland.
- GIERISCH, Andra: Mikroskalige Modellierung Meteorologischer und Anthropogener Einflüsse auf die Wärmeabgabe eines Gebäudes.
- GLASHOFF, Jenny: Klimavariabilität in einem eindimensionalen Planet Simulator Säulenmodell.
- LINDE, Marita: Modellierung des Einflusses von Windkraftanlagen auf das umgebende Windfeld.
- LUDEWIG, Elke: Evaluation of satellite cloud-top height measurements along stratocumulus to cumulus transition trajectories.
- LORENZ, Torge: WRF Model experiments on the atmospheric boundary layer over the Ronne Polynya in the Antarctic.
- MILLER, Andreas: Composites of Sudden Stratospheric Warming events in the high atmosphere re resolving GCM HAMMONIA.
- PELTRET, Dennis: A Rossby wave breaking climatology: Present day climate and greenhouse warming in ECHAM5.
- PORT, Ulrike: The role of dynamic vegetation cover in future climate change.
- RIECK, Malte: Testing the Liquid Water Lapse Rate Feedback in Shallow Convection using Large Eddy Simulations.
- SACK, Jeremy: Air Sea Interactions in the Southern Ocean during the BONUS GOODHOPE Campaign 2008 and comparisons with NCEP and ECMWF Reanalyses
- SUJATTA, Michael: Snowball Earth Experiments with the Planet Simulator.
- SCHIRBER, Sebastian: Parameter estimation in a general circulation model: from a perfect towards the real world.
- SCHUBERT, Jonathan: Die Madden-Julian Oszillation im MPI-M ESM in den letzten 1200 Jahren unter Berücksichtigung verschiedener externer Antriebe.
- STOFFELS, Nicole: Improving an Aerosol Climatology with Geostatistical Methods.
- Bachelorarbeiten*
- ATHMER, Rabea: Spatial and temporal patterns of surface albedo dynamics in Africa from models and observations.
- BECKER, Tobias: Skalenabhängigkeit statistischer Momente der Gesamtwasser-Verteilung im COSMO-DE und Evaluierung des Tompkins-Schemas.
- BÖTTCHER, Christina: Fallstudienüberprüfung der statistischen Ergebnisse der Satellit-Bodenmessung Kollokationssoftware KollSat: Analyse der Wetterlage tropischer Niederschläge an Bord von Forschungsschiffen und mittels Satellitendaten.
- BRAUTMEIER, Lena: Auswertung von Windkanal zur Simulation störfallartig freigesetzter Luftschadstoffe im Stadtgebiet von Hamburg.
- FROSS, Anna Katharina: Analyse des Niederschlags der 12-monatigen FS „Polarstern“ Disdrometerzeitreihe von Juni 2010 bis Mai 2011.
- GILLMEIER, Stefanie: Analyse von Strömungsmessungen an idealisierten Hügelstrukturen in einem Grenzschichtwindkanal.
- HANSEN, Akio: Validierung von Temperatur- und Feuchteprofilen aus der Fernerkundung mit dem passiven Mikrowellenradiometer HATPRO.
- HEISE, Susann: Literaturstudie zu Freistrahlmotoren und deren Verwendung im praktischen Immissionsschutz.
- HENNEBERG, Olga: Analyse zur Validierung statistischer Wolkenschemata durch Ensemblemitteilung.
- JANSSEN, Thilo: Visualisierung von Strömungsstrukturen im Nachlauf von Windkraftanlagen.
- KAMPRATH, Simon: Strukturen und Prozesse der Grenzschicht über einer Spalte im arktischen Meereis: Fallbeispiele des 04. April 2003 während der Messkampagne ABSIS 2003.
- KNIETZSCH, Marc-André: Optimierte Starkniederschlagswarnungen für den Alpenraum anhand eines Modellensembles.
- LÜBCKE, Max: Analyse der Sensitivität des Windertragsmodells WASP.
- MEHRENS, Anna Rieke: Entwicklung eines Profilkatalogs für die aerodynamische Modellierung von Windkraftanlagen bei niedrigen Reynoldszahlen.
- MERKER, Claire: Einfluss des Vertikalwindes auf Mikroregenradarmessungen.
- PLEHN, Luise: Ableiten der Zuggeschwindigkeit von Wolken aus Bildern der Wolkenkamera mittels Analyse des optischen Flusses.
- RUDOLF, Eva-Maria: Untersuchung von Starkniederschlägen der ENSEMBLES Regionalmodelle in der Metropolregion Hamburg.
- SCHEMMEL, Marie: Szintillometermessungen über Hamburg: Vergleich von Wärmeflussmessungen eines Szintillometers mit Sonicdaten des Hamburger Wettermastes.
- SCHRÖDER, Alexander: Analysis of Arctic Sea Ice Drift Decuded from Buoy Measurements during ABSIS 2003.
- SCHULTZE, Markus: Vertikalprofile von Temperatur, Feuchte, Wind und turbulenten Flüssen bei unterschiedlich strukturierten Inversionen anhand von Daten des Wettermastes Hamburg.
- TATARINOVA, Anastasia: Oberflächenenergiebilanz im Eisrandbereich der Framstraße in Abhängigkeit von der Wolken- und Eisbedeckung: Analyse der Flugzeugmessungen während FRAMZY 2002.
- WEDER, Christian Martin: Validierung und Optimierung des Soil-Vegetation-Atmosphäre-Transfer Schemas TERRA Standalone.

---

Universität Hannover

---

*Masterarbeit*

SAUER, Manuela: Konzeption zur Implementierung von winterlichen Wetterereignissen in Schnellzeitsimulationsmodelle des Luftverkehrs.

*Diplomarbeiten*

ACKENHAUSEN, Sascha: Die Vermittlung meteorologischen Wissens an Kinder und Jugendliche.

FIEDLER, Stephanie: Model Performance and Climate Change Assessment with REMO and REMO-HAM in East Asia.

FRICKE, Jens: Coriolis Instabilites in Coupled Atmosphere-Ocean Large-Eddy Simulations.

KLINGEBIEL, Marcus: Qualitätsanalyse von UV-Dosimetern.

KUBITSCHKE, Niklas: Leewellen und Wellensegelflug im Mittelgebirge.  
 MESTER, Sebastian: Gebirgsinduzierte Windphänomene am Internationalen Flughafen von Hong Kong.  
 SCHREMPF, Michael: Entwicklung eines Algorithmus zur Wolkenerkennung in Digitalbildern des Himmels.  
 STÜHRMANN, Ansgar: Entwicklung eines Systems zur Messung der Bidirektionalen Reflektanzfunktion.  
 WERKMEISTER, Astrid: Validation of Satellite Derived Cloud Data for Climate Research.

*Bachelorarbeiten*

BRAS, Hendrik: Vergleichende Zusammenstellung biologischer Wirkungsfunktionen im UV-Bereich.  
 GRONEMEIER, Tobias: Vermessung der planetaren Grenzschicht mittels Sodar.  
 HOFFMANN, Fabian: Auswirkung numerischer Verfahren auf die Stärke simulierter Staubteufel.  
 HUNDESHAGEN, Katrin: Auswirkungen spektraler Unterschiede im Sonnenspektrum bei verschiedenen Sonnenzenitwinkeln auf Solarzellen.  
 RÖSNER, Theresa: Über die Veränderung des Wohlbefindens von Menschen hinsichtlich des Klimawandels.  
 WEISMÜLLER, Maren: Untersuchung zur Flugzeugvereisung in den USA.

---

Universität Karlsruhe

---

*Habilitation*

KUNZ, Michael: Amplification of Atmospheric Processes Over Low Mountain Ranges and their Relevance for Severe Weather Events.

*Dissertationen*

DE BRITO, Joel Ferreira: A Lightweight High-Sensitivity Chemical Mass Spectrometer for Organic Compounds.  
 LANG, Simon: Perturbation dynamics and impact of different perturbation methods in tropical cyclone ensemble.  
 GRAMS, Christian: Quantifizierung des Einflusses außertropischer Umwandlung auf die Strömung der mittleren Breiten: Taifun Jangmi und weitere Fallstudien.  
 GRENZHÄUSER, Jens: Entwicklung neuartiger Mess- und Auswertungsstrategien für ein scannendes Wolkenradar und deren Anwendungsbereiche.  
 SASSE, Romi: Analyse des regionalen atmosphärischen Wasserhaushalts unter

Verwendung von COSMO-Simulationen und GPS-Beobachtungen.

*Diplomarbeiten*

BADEY, Janina: Strukturanalyse von konvektiven Systemen mittels Vorhersagen des ECMWF-Modells aus dem YOTC-Datensatz.  
 CHIRKOV, Maksym: Untersuchung der zeitlichen Entwicklung des HCFC-22 in der Atmosphäre anhand von MIPAS-Messungen.  
 FÖRSTER, Annette: Structural characteristics of the core region of T-PARC Typhoon Sinlaku in a vertically sheared environment. Strukturelle Merkmale der Kernregion des T-Parc Taifuns Sinlaku in vertikal gescherter Umgebung.  
 GRÜNEWALD, Till: Interpretation der Vergleiche von Temperaturen der Landoberfläche aus in-situ Messungen und METEOSAT-Daten.  
 HAGEMANN, Rowell: Abhängigkeit der räumlichen und zeitlichen Variabilität der mit der AERO-TRAM gemessenen Aerosolgrößen von atmosphärischen Bedingungen.  
 KAPSCH, Marie-Luise: Longterm variability of hail-related weather types in an ensemble of regional climate models.  
 KRAUT, Isabel: Numerische Simulationen zum Einfluss von Halogenverbindungen auf die troposphärische Photooxidationbildung auf der regionalen Skala.  
 QUINTING, Julian F.D.: Structural characteristics of Typhoon Sinlaku (2008) during its extratropical transition: an observational study. Strukturelle Eigenschaften von Taifun Sinlaku während seiner außertropischen Umwandlung: eine Beobachtungsstudie.  
 SCHMITZ, Sarah: Simulation der chemischen Zusammensetzung der oberen Troposphäre / unteren Stratosphäre mit dem regionalen Chemie-Transport-Modell COSMO-ART.

---

Universität Kiel

---

*Dissertationen*

HIERONYMI, Martin: Solar radiative transfer into the ocean: A study on underwater light fluctuations due to surface waves.  
 KALISCH, John: Der Einfluss von Wolken auf den Strahlungsantrieb der Erde.

*Diplomarbeiten*

CLAUS, Martin: The Gulf Stream Extension: Its dynamics and interaction with the atmosphere.

FUHLBRÜGGE, Steffen: Analysis of atmospheric VLSL measurements during the DRIVE campaign in the tropical East Atlantic.  
 GOLLAN, Gereon: Circulation anomalies in boreal winter: origin of variability and trends during the ERA-40 period.  
 HARLASS, Jan: Einfluss des arktischen Meereises auf das Klima der Nordhemisphäre.  
 VOSS, Alina: Statistische Modellierung extremer Pegelstände an der deutschen Ostseeküste.

*Bachelorarbeiten*

HAASE, Sabine: Atmosphärische Zirkulation und extremer Meereisrückgang in der Arktis: Gegenwärtiges und zukünftiges Auftreten der arktischen Dipol-Anomalie.  
 KLEINELANGHORST, Christin: Die Beziehung der El Nino/Southern Oscillation und der Nordatlantischen Oszillation.  
 MECKING, Rebekka: Einfluss der synoptischen Situation auf die Validierung von Niederschlägen aus Satellitendaten über der Ostsee.  
 REINTGES, Annika: Abschätzung der Genauigkeit von Klimasimulationen im Bereich des Nordatlantiks.  
 RUMPEL, Verena: Meteorologische Auswertung der TransBrom Sonne Kampagne im tropischen Westpazifik.

---

Universität Köln

---

*Habilitation*

PINTO, Joaquim: Extreme European wind storms: diagnostics, downscaling and climate change.

*Dissertationen*

DOEGE, Martin: A 3-D Chemistry Transport Model of Titan's Thermosphere.  
 GORIS, Nadine: Singular Vector Based Targeted Observations of Atmospheric Chemical Compounds.  
 JACOBSEN, Sven: Three-Dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Io's Non-Linear Interaction with the Jovian Magnetosphere.  
 KNEIFEL, Stefan: Characterization of snowfall using ground-based passive and active remote sensors.  
 MÜLLER, Anna Liane: Energetic particle injection events in the Koronian mag-

- netosphere: applications and properties.
- NIERADZIK, Lars Peter: Four-Dimensional Variational Assimilation of Aerosol Data from in-situ and Remote Sensing Platforms.
- REYERS, Mark: Simulierte CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Flüsse über heterogenem Gelände - Kopplung eines Photosynthese-Modells mit dem meteorologischen Modell FOOT3DK.
- SCHICKLING, Anke: Remote sensing of sun-induced fluorescence for improved modeling of gross primary productivity in a heterogeneous agricultural area.
- ZACHARIAS, Stefan: Energiehaushalte aus Flugzeugmessungen und hoch aufgelösten Simulationen mit dem meteorologischen Modell FOOT3DK.
- Masterarbeit*
- HÜGING, Hanna: Possible changes in wind energy potentials over Europe under future climate conditions using a RCM ensemble.
- Diplomarbeiten*
- ADRIAN, Juliane: Untersuchung von Schlammvulkanen in Perekishkul, Aserbaidschan mit der Transient-Elektromagnetik.
- BEHNKE, Kim Kaja: Die Vorhersagbarkeit der Entwicklung konvektiver Zellen nach Meteosat Second Generation-Daten.
- DENK, Astrid: Analysis of ship-borne and helicopter-borne magnetic data in the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica.
- ENGEL, Thomas: Sensitivity of the regional climate model REMO on land use changes in Africa 1989-2007.
- GRÄTSCH, Sebastian: Einfluss des Klimawandels auf den Weinertrag in der Portwein Region basierend auf einem Multi-Modell RCM Ensemble.
- GROBBACH, Hannah: Erste Anwendung der Radiomagnetotellurik auf Schlammvulkanen in Perekishkul/Aserbaidschan.
- MARTINS, Miguel: Identification and global climatology of upper-level troughs at low latitudes in ECHAM5.
- von PAPEN, Michael: Spatial Constrained Inversion von In-Loop TEM Daten zur Bestimmung der Grundwasserkontamination in Roorkee, Indien.
- REDL, Stephanie: Mikrowellensignale von unterkühlten Flüssigwasserwolken.
- SCHMIDT, Thomas: Analyse der Vorhersagegüte eines Chemie-Transport-Modells (CTM) mit Data Mining Verfahren.
- STEINKE, Sandra: Wasserdampftomographie mit zwei Mikrowellenradiometern.
- Bachelorarbeiten*
- BLÖCKER, Aljona: Realisierung der ionosphärischen Halleffekt-Näherung am Beispiel von Io
- FRANKE, Philipp: Die Simulation der Windkanalisation und Spurenstofftransport durch Täler in Abhängigkeit der Modellauflösung
- HENCKES, Philipp: How much iron is deposited to Atlantic - An Ensemble Examination of Iron Deposition Sensitivity to Particle Size Distribution
- HÖPP, Simona: Dusty Mars.
- LANGE, Anne Caroline: Validierung der EURAD-IM-Vulkanaerosolsimulation vom Ausbruch des Eyjafjallajökull im April 2010 mit Lidar- und Ceilometerdaten
- MÖMKEN, Julia: Der Einfluss von Stratospheric Sudden Warmings auf die Kopplung von PNA und NAO
- SEIDEL, Marc Alexander: Auswirkungen der Magnetfeldrichtung in stellaren Winden bei der Plasma-Wechselwirkung mit Exoplaneten
- van TREECK, Shari: Dynamik von Saturns Magnetodisk in der Nähe des Mondes Titan
- YUEN, Dominique: Besonderheiten explosiver Zyklonogenese über dem Südwesten des Nordatlantik am Beispiel des Sturmtiefs Xynthia
- 
- Universität Leipzig
- 
- Dissertationen*
- ARRAS, Christina: A Global Survey of Sporadic E Layers based on GPS Radio Occultations by CHAMP, GRACE and FORMOSAT-3/COSMIC.
- VOIGTLÄNDER, Jens: Hygroscopic growth and CCN activation of slightly soluble organic and inorganic compounds - Evaluation of experimental LACIS data with FLUENT/FPM.
- Diplomarbeiten*
- BARTHEL, S: Modellierung des Lebenszyklus und der Chemie von Seesalzaerosolen in der maritimen Grenzschicht.
- BRECHT, Benedikt: Akustische Anemometrie und Thermometrie.
- BRÜCKNER, Marlen: Depolarisationsmessungen in Cirren mit einem konventionellen Rückstreulidar.
- FRICKE, Clemens: Messung und Simulation polarisierter Strahldichten: Einfluss des solaren Zenitwinkels und der Aerosol optischen Dicke.
- FRIEDRICH, Anett: Messung und Modellierung der kumulierten thermischen Belastung in Leipzig.
- GEIMECKE, Christina: Regionale Modellierung direkter und indirekter Effekte des Saharastaubs über Europa.
- GÖBEL, Tina: Hygroskopizität anthropogener Aerosole bei hohen Feuchten in der nordchinesischen Tiefebene.
- GROSS, Peter: Global Distribution of Submicrometer Aerosol Particles: Comparison between In Situ Measurements and Global Model Outputs.
- KAMILLI, Katharina: Hygroskopische Eigenschaften des urbanen Aerosols einer europäischen „Megacity“.
- KINDER, Friederike: Hygroscopic properties of atmospheric aerosol particles in central Europe.
- LONITZ, Katrin: Comparison of MISR and Meteosat-9 Cloud Motion Winds.
- LOUCA, Kyriakos Yiannakis: Untersuchung der Eigenschaften von Windprofilen in der atmosphärischen Grenzschicht mit verschiedenen Messmethoden am Standort Lindenberg.
- OPELT, Claudia: Räumliche Variabilität atmosphärischer Partikelgrößenverteilung im städtischen Ballungsraum Dresden.
- RADDATZ, Michael: Messungen von Impaktwinkeln und Auslösewinkeln von Sandkörnern mittels Hochgeschwindigkeitskamera.
- RÖSCH, Carolin: Indoor air and health effects.
- ROST, Florian: Untersuchung und Simulation des Einflusses von Turbulenz auf die Schallausbreitung in der Atmosphäre.
- SCHLIMPER, Susan: Meteorologische und statistische Auswertung von Langzeitmessungen zur Charakterisierung des Aerosols an der Forschungsstation Melpitz.
- SCHMEIBNER, Tina: Tropical free tropospheric aerosol microphysical properties measured at a high altitude research station in the Venezuelan Andes.
- SCHÖNE, Luisa: Laboruntersuchungen zur möglichen SOA-Bildung infolge

der troposphärischen Isoprenoxidation.

- SEELIG, Torsten: Vergleich barokliner Moden in Modell und Experiment.  
 SMALLA, Alexander: Hoch aufgelöste Chemietransport-Modellierung für den Großraum Dresden mit dem WRF/Chem-Modell.  
 STADLER, Andreas: Vergleich von Windmessungen mit einem SODAR und anderen Messmethoden am Standort Lindenberg.  
 STOLL, Jens: Kopplung des Wettermodell WRF (ARW) mit dem Chemietransportmodell MUSCAT: Vergleich mit weiteren meteorologischen Antrieben  
 THIEM, Elisabeth: Physikalische Eigenschaften des atmosphärischen Aerosols am Polarmeer in Nordalaska.  
 UNGLAUB, Claudia: EUV-TEC: Ein Index zur Beschreibung der ionosphärischen Variabilität.

---

Universität Mainz

---

*Dissertationen*

- FLORES, Jorge Michel: Laboratory study on the optical properties of absorbing atmospheric aerosols and field applications.  
 FREY, Wiebke: Airborne in situ measurements of ice particles in the tropical tropopause layer.  
 REITZ, Paul: Chemical composition measurements of cloud condensation nuclei and ice nuclei by aerosol mass spectrometry.  
 SCHMALE, Julia Yvonne: Aircraft-based in-situ aerosol mass spectrometry: chemical characterization and source identification of submicron particulate matter in the free and upper troposphere and lower stratosphere.

*Diplomarbeiten*

- GIERTH, Franziska: Lagrangesche Betrachtungsweise des Mineralstaubzyklus mit dem Modell ECHAM5/MESSy.  
 WOLF, Gabriel: Mischen am Wolkenrand in einfachen Modellen für Feuchtkonvektion.

---

Universität München

---

*Dissertationen*

- DIETMÜLLER, Simone: Relative Bedeutung chemischer und physikalischer

Rückkopplungen in Klimasensitivitätsstudien mit dem Klima-Chemie-Modellsystem EMAC/MLO.

- GASTEIGER, Josef: Retrieval of microphysical properties of desert dust and volcanic ash aerosols from ground-based remote sensing.  
 GROSS, Silke: Aerosol characterization by multi-wavelength Raman and depolarization lidar observations.  
 HAMBURGER, Thomas: Aerosol microphysical properties during anticyclonic flow conditions over Europe.  
 HARNISCH, Florian: Forecast influence of adaptive airborne observations in the western North Pacific basin.  
 KÜHNLEIN, Christian: Solution-adaptive moving mesh solver for geophysical flows.  
 SANDER, Julia: Extremwetterereignisse im Klimawandel- Bewertung der derzeitigen und zukünftigen Gefährdung.

*Diplomarbeiten*

- DIEBEL, Sebastian: Gewittervorhersage über dem nördlichen Mittelmeerraum mit Hilfe von Satellitendaten.  
 FERRARI, Christian: Entwicklung von Kondensstreifen in präexistierenden Zirren.  
 GRAF, Phoebe: Der Einfluß des Klimawandels auf die Ozonschicht.  
 HEIMERL, Katharina Elisabeth: Characterisation of the DLR Single Particle Soot Photometer and its Sensitivity to Different Absorbing Aerosol Types.  
 HUNG, Duy Sinh Cai: Eine Sensitivitätsstudie über den Einfluss polarer Meereisbedeckung auf die Dynamik der unteren Stratosphäre.  
 KRAL, Stephan: Observations on the Atmospheric Boundary Layer in an Arctic Fjord System during Summer.  
 KREYLING, Daniel: Handling Particle Number Density calculations inside the Radiative Transfer Model ARTS.  
 MUND, Susanne: Modifikation von Saharastaubaerosol während SAMUM-2.  
 PIPER, David: Analyse warnrelevanter Windereignisse am Bodensee zum besseren Verständnis der synoptischen Prozesse und zur weiteren Optimierung des Sturmwarndienstes.  
 VEIRA, Andreas: The Dakar plume: A SAMUM-2 case study on the plume structure and the influence of urban emissions on dust physico-chemical and radiative properties.

---

Technische Universität München

---

*Masterarbeiten*

- DHITAL, Sanjaya: Use of public internet-connected webcam images for monitoring plant phenology in Germany:  
 DIATTA, Rodrigue A.: New water management challenges in Sub-Saharan Africa: analysing the large dam debate through Uganda's Bujagali hydropower project:  
 ECKHARDT, Stephanie: Vergleich von Frühstadien internationaler Kiefernherkünfte im Hinblick auf den Klimawandel:  
 ENGLERT, Jennifer: Die Verteilung von VOCs entlang von Höhengradienten in den bayerischen Alpen:  
 GHADE, Wael: Meteorological influence on precipitation properties:  
 LÜPKE, Marvin: Advanced measurement of precipitation under canopy influence:  
 MEURER, Stephanie: Mikroklimatische Aspekte in den Städten München und Ingolstadt sowie ihre Auswirkungen auf die Phänologie allergener Pflanzen:  
 SANCHEZ, Adriana: Development of a computer based 1D-2D dynamic flood model. Case study of the Pagsangaan river basin in Leyte, the Philippines.  
 SEIFERT, Holm: Räumliche Verbreitung ausgewählter Baumarten in Europa und deren GIS-Analyse in Abhängigkeit von Klimafaktoren:

---

Universität Oldenburg

---

*Dissertation*

- BEHRENDT, Tanja: Bestimmung der spektralen Solarstrahlung am Erdboden aus Satellitendaten zur Bewertung des Leistungsverhaltens von Dünnschicht-Solarzellen

*Diplomarbeit*

- KÜHNERT, Jan: Charakterisierung und Vergleich unterschiedlicher Photovoltaik-Materialien in Abhängigkeit vom Spektrum der Solarstrahlung.

---

Universität Basel

---

*Masterarbeit*

- MEULI, Thomas: Performance Test of an

eddy covariance system in three different environments.

---

#### Universität Graz

---

##### *Habilitation*

FOELSCHE Ulrich: Probing Earth's Atmosphere and Climate with Signals from GPS Satellites.

##### *Dissertationen*

AWAN, Nauman Khurshid: Role of the bit of climate models.

KABAS, Thomas: Wegener Net Klimastationsnetz: Experimenteller Aufbau und hochauflösende Daten für die Klima- und Umweltforschung.

LADSTÄDTER, Florian: On Upper-Air Climate Data: Interactive Visual Exploration and GPS Radio Occultation as Reference Climate Record.

THEMESSL, Matthias: Empirical-statistical downscaling and error correction of temperature, precipitation, and derived extremes in Europe.

##### *Diplomarbeiten*

GÖGER Michael: Der Vergleich von Atmosphärenprofilen mit einem Inter-Validierungssystem und dessen Anwendung auf Radiookkultations- und Radiosondendaten.

WURZER Arnulf: Validation of a Snow Drift Model at the Planneralp, Austria.

##### *Bachelorarbeiten*

BRUNNER, Lukas: Manteldiapire und Hot Spots.

GRUBER, Friedrich: El Nino und die Southern Oscillation (ENSO): Meteorologische, ozeanographische, biologische und soziale Aspekte.

HOFER, Marianne: Klimawandel = Klimaschwindel? Häufig gestellte Fragen zum Klimawandel.

HOLZHAIDER, Klaus: The Origins of the Geomagnetic Field.

JOEBSTL, Lisa: Extreme Tagesniederschläge an der meteorologischen Station der Universität Graz seit 1894.

KNABL, Samuel Andreas: Erdwärme in Österreich - Potential, Technologien, Perspektiven.

MUCKENHUBER, Stefan: Kohlebrände und deren Auswirkungen auf unser Klimasystem.

PFANNHOFER, Florian: Methoden der Wettervorhersage.

PLACH, Andreas: Physikalische Erklä-

rungstheorien des alpinen Föhns.

POIER, Hannes: Geothermie in Island.

ROSENBERGER, Stefan: Modelling Feedbacks in the Climate System.

SABATHIEL, Nikolaus: Windsysteme und das barotrope Modell.

SCHEIDEL, Daniel: Klimarekonstruktion aus historischen Quellen.

STABAUER, Julaine: Vulkanismus - Eine genauere Betrachtung des Ausbruchs des Vesuvus 79 n Chr. Und des Eyjafjalajökulls 2010.

SZEBERENYI, Katalin: Atmosphärische Elektrizität und ihre Phänomene.

---

#### Universität Innsbruck

---

##### *Dissertationen*

ABERMANN, Jakob: Glaciers in Austria, Past and Present.

DRECHSEL, Susanne: Lower Tropospheric Wind.

WINKLER, Michael: Kilimanjaro Ice Cliffs.

##### *Masterarbeit*

OECHSLIN, Roger: Wind Power Forecasting Considering Icing.

##### *Diplomarbeiten*

BLUMTHALER, Ursula: Reproduction of Dynamical Behaviour of Vernagtferner, Ötztal Alps, with Numerical Methods.

HABERKORN, Anna: Assessing the contribution of basal melt processes to the local mass balance at the tongue of Hintereisferner, Ötztal, Austria.

HÖSS, Markus: Untersuchung der Luftqualität im Stadtbereich Augsburg während zweier Winter.

ORTNER, Martin: Okklusionen: Warm- oder Kaltluftcharakter?

SCHÖNEGG, Moritz: Polarmetrische Fernerkundung von Wolkenseiten zur Bestimmung der Wolkenphase.

SCHREINER, Veronika: Dynamic and thermal mechanisms affecting the location of convective initiation over the Vosges mountains during COPS.

STAUFFER, Reto: Das A-UMOS: "updateable model output statistics"-System für Europa.

VOGLMEIER, Karl: Retrieval of snow characteristics by QuikSCAT backscatter measurements over North Slope, Alaska.

WAGNER, Johannes: The Mesoscale Structure of a Polar Low: Simulations and Airborne Measurements. WIR-

BEL, Anna: Physically Based Ice Melt beneath Supraglacial Debris, driven by a Reduced Set of Input Parameters.

ZIMMER, Florian: Kurzfristvorhersage der Wolkenbedeckung zur effizienten Nutzung von Solarenergie.

---

#### Universität Wien

---

##### *Diplomarbeiten*

BÜGELMAYER, Marianne: Der Einfluss des längenabhängigen Ozons auf die winterliche allgemeine Zirkulation der Atmosphäre in mittleren und hohen Breiten.

DOBLHOFF-DIER, Katharina: Seismic signal analysis using polarization attributes and its application.

FUCHSLUGER, Martin: Akquisitiondesign für die seismische Erkundung des tiefen Wiener Beckens auf Basis eines Untergrundmodells.

HADZIMUSTAFIC, Jasmina: Vergleich von Homogenisierungsverfahren.

KIESENHOFER, Stefan: Vorhersageverifikation hochauflösender Modellapplikationen mit MET und VERA im Rahmen von MAP D-PHASE.

KOMPEIN, Niko: Feldfortsetzung nach unten - Vergleich ausgewählter Verfahren und Reduktion zum Pol auf unebenen Flächen.

MAYER, Stefan: Verifikationsmethoden für Wetterradarextrapolationen.

STEINER, Andrea: Qualitätskontrolle synoptischer Daten.

ZEKIR Fatime: Erstellung von Temperaturkarten für das südliche Wiener Becken.

---

#### Universität Zürich

---

##### *Dissertationen*

ARFEUILLE, Florian: Impacts of large volcanic eruptions on the stratosphere and climate.

BARMPADIMOS, Iakovos: Trends and variability of airborne particulate matter in Switzerland and Europe.

BOSSHARD, Thomas: Hydrological climate-impact modelling in the Rhine catchment down to Cologne.

BRABEC, Martin: Backscatter and humidity measurements in cirrus and dust clouds using balloon sondes.

CHOU, Cédric: Investigation of Ice Nucleation Properties onto Soot, Bioaerosol and Mineral Dust during Different

Measurement Campaigns.  
 FUSINA, Fabian: The multiscale aspect of cirrus cloud dynamics.  
 HUBER Markus: The earth's energy balance and it's changes – implications for past and future temperature change.  
 KELLER, Christoph: Assessment of European emissions of non-CO2 greenhouse gases by a 1 ETH Zurich, Institute for combination of continuous measurements, transport models and Rn-222 Atmospheric and Climate emission maps (LEMURE).  
 LADINO MORENO, Luis Antonio: Experimental study on collection efficiency and contact freezing of aerosols in a new collision chamber.  
 MARTIN, Maria Anna: Measurements of cloud condensation nuclei properties of remote and anthropogenic aerosols.  
 MASSON, David: Statistical uncertainty analysis in an ensemble of global climate models.  
 MITTELBACH, Heidi: Soil moisture in Switzerland: Analyses from the Swiss Soil Moisture Experiment.  
 OLIVEIRA, Paulo: Vegetation-mediated impacts of trends in climate forcing on land hydrology.  
 SCHLEMMER, Linda: The diurnal cycle of midlatitude, summertime moist convection over land in an idealized cloud-resolving model.  
 PANDEY, Shubha: Peroxyacetylnitrate (PAN) and NOy at the interface of free troposphere and planetary boundary layer at Jungfraujoch.  
 PANZIERA, Luca: Orographic forcing, the key for heuristic nowcasting of rainfall in the Alps.  
 SESARTIC, Ana: Bacteria and fungal spores in the global climate model ECHAM5-HAM.  
 ZELENAY, Veronika: Water uptake and chemical composition in single submicron particles analyzed by X-ray micro-spectroscopy.  
 ZIEGER, Paul: Effects of relative humidity on aerosol light scattering.

Nachträge für das Jahr 2010:

---

Universität Mainz

---

*Habilitation*  
 SCHNEIDER, Johannes: Chemical composition of tropospheric submicron aerosol particles: from fresh emissions to aged oxidized aerosol.

*Dissertationen*  
 ZIMMER, Matthias: Merkmalsbezogene Verifikation hochaufgelöster Niederschlagsvorhersagen für Deutschland.  
 DÖRNER, Stefan: Comparisons of stratospheric meteorology and chemistry in satellite observations, EMAC simulations and ECMWF analysis data.

## Examina im Jahr 2012

### Habilitationen, Dissertationen, Master-, Diplom- und Bachelorarbeiten in der Meteorologie und verwandten Fächern aus dem deutschsprachigen Raum

---

#### Universität Bayreuth

---

##### *Masterarbeiten*

- BAUMER, Maria: Vergleich zweier Lagarange'scher Modelle zur Bestimmung des Footprints über heterogenem Gelände.
- DIESING, Sophie Ch.: Kammerexperimente zur Bildung von partikulärem Iodat bei Reaktion von Natriumiodid mit Ozon.
- EDER, Fabian: Influence of a clear cut on properties and vertical coupling of coherent structures
- KITTLER, Fanny: Direkte Eddy-Kovarianz-Messung vertikaler Aerosolflüsse mit einem Fast CPC (gemeinsam mit Atm. Chemie).
- SEITH, Theresa: Comparison of lidar and in situ aerosol number measurements above a walnut orchard in California.

##### *Bachelorarbeiten*

- FLACH, Milan: Statistische Zusammenhänge zwischen Feuchtigkeitsfilmen auf Fichtennadeln und Umweltparametern.
- HEINZMANN, Verena: Auswertung des Present Weather Sensors (Wettercode, Niederschlag, Sichtweite) an der Grenze zwischen ozeanischer und kontinentaler Klimaprägung am Mittelgebirgsstandort Waldstein (Fichtelgebirge, Nordost-Bayern).
- SCHALLER, Carsten: Untersuchung des Mikroklimas des EVENT-Experimentes mittels eines horizontal beweglichen Messsystems.
- SCHMIDT, Rabea: Feldmessungen mit einem DMPS - Charakterisierung der Ladungseffizienz.
- SCHMITT, Markus: Entwicklung einer Thermodesorptionseinheit zur Bestimmung von leichtflüchtigen organischen Verbindungen mittels GC-FID.

---

#### Freie Universität Berlin

---

##### *Dissertationen*

- BLUME, Christian: Statistical learning to model stratospheric variability.
- HOLLSTEIN, André: Vector radiati-

ve transfer and its application to the remote sensing of aerosols and hydro-

##### *Masterarbeiten*

- BIERSTEDT, Svenja: Klimaänderungssignal extremer Hitze und Trockenheit.
- DIEDRICH, Hannes: Quantifizierung von Unsicherheiten bei der Bestimmung von tmosphärischem Wasserdampf mit zukünftigen Satelliteninstrumenten.
- FISCHER, Madlen: Untersuchung saisonaler Variationen von Extremniederschlägen in Deutschland mittels instationärer statistischer Modelle .
- HANF, Franziska: Die Ozean-Atmosphären-Kopplung des südasiatischen Sommermonsuns und dessen Veränderungen während des letzten Jahrtausends.
- KÖHLER, Philipp: Satellitengestützte Fernerkundung von Chlorophyllfluoreszenz mit Hilfe von GOSAT-Daten.
- LANGE, Julia: Untersuchung polarer Mesozyklen mit Hilfe eines objektiven Identifikationsalgorithmus.
- SOMMERFELD, Anja: Validierung des hochaufgelösten Regionalmodells CCLM für das Ostafrikanische Grabensystem und Untersuchung des Einflusses orographischer Änderungen auf das regionale Klima.
- VOIGT, Maximilian: Statistisches Downscaling von extremen Windböen mit künstlichen neuronalen Netzen.
- WILD, Simon: Einfluss aus mittleren Breiten auf die interannuale Variabilität des südasiatischen Sommermonsuns.

##### *Diplomarbeiten*

- KADOW, Christopher: Atmosphärische Gezeiten und deren Einfluss auf die Erdrotation.
- KRÜGER, Katrin: Einfluss von ENSO auf die winterliche stratosphärische Variabilität der Nordhemisphäre – Studien mit EMAC-FUB und ERA-40.
- SORGE, Jacob: Reanalysen des chemischen arktischen Ozonverlustes.

##### *Bachelorarbeiten*

- BASUK, Nadine: Optimierung eines ballongetragenen Frostpunkthygrometers

in der unteren Troposphäre.

- DROSE, Kerstin: Untersuchung kleinskaliger Starkwindereignisse über Hessen.
- FRANKE, Justus: Entwicklung eines Verfahrens zur Fernerkundung der Meeresoberflächentemperatur.
- KAMINSKI, Stefanie: Untersuchung der Auswirkung einer Chlor-Störung durch FCKs in der Stratosphäre mit dem Klima-Chemie-Modell EMAC-FUB.
- KARB, Anastasia: Verbesserung der Rückführbarkeit von Ozonsondenmessung.
- KECK, Therese: Einfluss von Höhe und aerosol-optischer Dicke auf simulierte Radianz am oberen Rand der Atmosphäre.
- KONRAD, Niels: Investigation of the relation between observations of air quality concentration and meteorological parameters.
- LANGE, Katharina: Analyse der Andauer und Stärke von Temperaturanomalien in Abhängigkeit von zeitlichen Skalen für Berlin-Dahlem.
- LANGENHAN, Sandy: Die zukünftige Klimaentwicklung in Indien und ihre Auswirkungen auf den Monsun.
- METZNER, Stefan: Simulation des Northern Annular Mode im Chemistry-Climate Model EMAC der FU Berlin.
- RITSCHEL, Christoph: Kopplung des Sommerniederschlages in Europa mit dem Monsun in Indien.
- ROLOFF, Florian: Räumliche Variabilität von Satelliten-Synop-Korrelation.
- SCHLEGELMILCH, Agnieszka: Analyse der mehrjährigen Variation des Wasserdampfes über der Iberischen Halbinsel mit Hilfe von MODIS-Satelliten-Daten.
- SCHLEGELMILCH, Marius: Analyse der mehrjährigen Variation der Wolkenbedeckung über der Iberischen Halbinsel mit Hilfe von AVHRR-Satelliten-Daten.
- SCHMIDT, Francie: Temperatur- und Wasserdampftrends in der polaren Sommermesosphäre in der Periode 1960-2100.
- SCHMIDT, Franziska: Untersuchung des Einflusses der QBO auf die Variabilität in der winterlichen Stratosphäre der Nordhemisphäre.

SCHMITZ, Adrian: Future changes in the variability of the austral polar stratosphere .  
 WALTER, Anne: Analyse der Stärke und Länge der Druckanomalien der Station Potsdam der letzten 100 Jahre.  
 WALZ, Michael: Zusammenhang zwischen der Nordatlantischen Oszillation und Sturmschäden in Deutschland.

---

Universität Bonn

*Dissertationen*

DÜSTERHUS, André: Statistical Quality Assurance and Peer Review in Primary Data. Publication

*Masterarbeiten*

BIERDEL, Lotte Beata: Mesoskalige Turbulenz in dem konvektionsauflösenden Wetter-Vorhersagemodell COSMO-DE-EPS.

*Diplomarbeiten*

BORAU, Corinna: Analyse der zeitlichen Entwicklung konvektiver Niederschlagszellen.  
 MEMMEL, Sebastian: A Bayesian Hierarchical Model for the Estimation of Wind Gusts  
 WYSS, Adriana: Lineare stochastische Modelle.

*Bachelorarbeiten*

KLIMATZ, Steffen: Untersuchung und Vorhersage von Inversionswetterlagen in Mitteleuropa mit dem COSMO-DE Modell.

---

Universität Frankfurt

*Dissertationen*

SENF, Fabian: On the interaction between thermal tides and gravity waves in the middle atmosphere.  
 KOTHE, Steffen: The radiation budget in a regional climate model.

*Diplomarbeiten*

DANIELCZOK, Anja: Flugzeuggestützte Messungen der Eiskeimkonzentration.  
 ECK, Fabian: Bodenfeuchte-Niederschlagswechselwirkung als Rückkopplungsprozesse.  
 FUCHS, Claudia: Weiterentwicklung des Differenziellen Thermodesorptions-Mobilitätsanalysators zur chemischen Analyse von Nano-Aerosolpartikeln.

KOHN, Monika: Messung von Eiskugeln in der marinen atmosphärischen Grenzschicht.  
 OSTERMÖLLER, Jennifer: Bestimmung stratosphärischer Lebenszeiten von Spurengasen mit der Korrelationsmethode.  
 SCHROD, Jann: Neue Konzepte der elektrostatischen Aerosolabscheidung und deren Anwendung zur Bestimmung der Eiskeimkonzentration.

*Bachelorarbeiten*

DENNER, Melanie: Die Beziehung zwischen biogenen Kohlenwasserstoffen und Eiskeimen am Kleinen Feldberg.  
 HELGERT, Sebastian: Untersuchung von konvektiven Zellen und leeseitigen orographischen Niederschlägen im Taunus.  
 HIEN, Steffen: Höhengradient des Niederschlags im Taunus.  
 KOHL, Rebecca: Untersuchung der Wolkenkeime am Kleinen Feldberg.  
 PIEPER, Patrick: Von der Firnverdichtung zur Oberflächenhöhe von Austfonna, Svalbard.  
 PIEROTH, Martin: Datenassimilationsexperimente in einem gekoppelten Lorenzsystem.  
 RÜCKEL, Stefan: Ist die Sahara eine Wüste?  
 VOLLBRECHT, Anna: Test der Taylor-Hypothese mittels Wetterradardaten im Raum Frankfurt.  
 WEBER, Daniel: Kaltluft in einer Blockhalde.

---

Technische Universität  
 Bergakademie Freiberg

*Diplomarbeiten*

ANDRES, M.: Einfluss von Energiepflanzenanbau und Erosion auf die Spurengasflüsse (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) und C-Bilanzen im norddeutschen Tiefland.  
 FIEDLER, B.: Gewitter in Thüringen – Auftreten nach Wetterlagen, zeitlicher Frequenz (Tagesordnung, Monat, Jahreszeit) und Lokalität.  
 HALBAUER, K.: Entwicklung und Erprobung einer optimierten Bearbeitungseinheit für die Analyse von Bodengasen.  
 MIKETTA, W.: Changes in spatio-temporal characteristics of wet and dry periods in 20th Century Europe.  
 WEISS, L.: CO<sub>2</sub>-Flüsse rekultivierter Böden am Beispiel von Braunkohlentagebauebenen von Sachsen.

*Bachelorarbeiten*

BADECKE, R.: Raum-zeitliche Verteilung von Nebellagen und Nebelwasser-Chemie im oberen Erzgebirge.  
 HÄNIG, A.: SPI-Trend im 21. Jahrhundert für die REGKLAM-Modellregion.  
 LORENZ, J.: Charakterisierung der Aerosolbelastung eines Hintergrundmessstandortes im Erzgebirge durch Filteranalysen mittels RFA.  
 MÜLLER, A.: Challenges in adapting to regional climate change.

---

Universität Freiburg

*Bachelorarbeiten*

AUEL, Annkathrin: Analyse thermischer Bedingungen von Innen- und Außenklima im Freiburger Rieselfeld.  
 ALBRECHT, Bernadette: Der Einfluss von Bäumen auf Milchkühe unter Hitzestressbedingungen.  
 BAUCHE, Jan Paul Quantification of the thermal bioclimate and its variability in the Russian Far East - at the example of Birobidzhan.  
 BROSZY, Caroline: The bioclimate potential of tourism in Croatia in 21st century.  
 DEMOUGIN, Philippe: Leistungspotenzial der Windenergieproduktion.  
 DILLIOGLU, Natalie: Analysis of tourism climate related potential in Istanbul, Turkey.  
 EWIG, Inga: Untersuchungen zur Anwendbarkeit des Strahlungstransfermodells SMARTS.  
 GALABOFF, Sandra Patricia: Methoden zur planungsbezogenen Bewertung der Luftqualität mithilfe von flächenhaften Immissionskarten.  
 GHASEMI, Isa: Modellierung der thermischen Belastung in urbanen Gebieten als ein Aspekt stadtklimagerechter Planung - am Beispiel Stuttgart West.  
 FIBICH, Kira: Retrospektive Entwicklung von Klimavariablen an ausgewählten Stationen des Deutschen Wetterdienstes in Südwestdeutschland.  
 FRÖHLICH, Beate: Lufthygienische Auswirkungen der zweitägigen Sperrung einer dicht befahrenen Bundesstraße durch Freiburg.  
 GACKENHOLZ, Ewa Christiane: Stadtklimatische Analyse einer lokalen Flächennutzungsänderung am Beispiel der Gutleutmatte in Freiburg.  
 JUNG, Christopher: Statistische Analyse der Windgeschwindigkeit in Baden-Württemberg.

- LACHER, Larissa: Analyse des thermischen Bioklimas von Zürich.
- MAURER, Daniel: Vergleichende Analyse der Erträge einer Solar- und Kleinwindanlage.
- MÜHLEIS, Matthias: Simulationen zu den stadtklimatischen Auswirkungen physikalischer Gebäudeeigenschaften.
- RAMMELBERG, Joscha: Bestimmung des thermischen Bioklimas bei idealisierten Gebäudekonfigurationen am Beispiel Stuttgart, Rosensteinviertel.
- SCHERZINGER, Simon: Thermische Auswirkungen von Fassadenbegrünung auf die Urban Canopy Layer.
- TIELESCH, Carlos: Ultrafeinaerosole und Niederschlag - Trendanalyse für Sachsen und südliches Brandenburg.
- VITT, Ronja: Quantification of climate tourism potential based on urban-rural differences: The case of Szeged, Hungary.

---

Universität Hamburg

---

#### Dissertationen

- BARKHORDARIAN, Armineh: Consistency of recent climate change and expectation as depicted by scenarios over the Mediterranean region.
- BATHIANY, Sebastian: Analysis of multistability and abrupt transitions-method studies with a global atmosphere-vegetation model simulating the end of the African Humid Period.
- BOHNENSTENGEL, Sylvia: Can a simple locality index be used to improve mesoscale model forecasts?
- CHEN, Fei: Multi-decadal climatology of Polar Lows over the North Pacific.
- HOFFMANN, Peter: Quantifying the influence of climate change on the urban heat island of Hamburg using different downscaling methods.
- LENGFELD, Katharina: Assessing near surface variability with a wireless sensor network on the small scale.
- PETRIK, Ronny: Physical validation and bracket-based dynamical cores for mesoscale NWP models.
- POLADE, Suraj: Diagnostic verification of atmospheric water cycle predicted by regional mesoscale models and ensemble systems.
- XIA, Lan: Long-term variability of storm track characteristics.
- ZHANG, Dan: Climate variability in East Asia in simulations and reconstructions in the last 1200 years.

#### Masterarbeiten

- BLOCK, Karoline: Forcing, feedbacks and effective climate sensitivity in MPI-ESM-LR.
- BOYSEN, Lena R.: Biogeophysical and biogeochemical effects of anthropogenic land cover changes on climate in CMIP5 projections for the 21st century.
- BURDANOWITZ, Jörg: Exploring the nature of light rain in the trades as observed by satellite- and ground-based remote sensing.
- GRÜNWALD, Stefanie: Evaluation von Ertragsvorhersagen für photovoltaisch erzeugten Strom, basierend auf Strahlungsvorhersagen der Modelle COSMO-DE, COSMO-EU und COSMO-DE-EPS.
- HEISE, Susann: Untersuchungen zur Nahfeldausbreitung von Emissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen.
- NESKE, Stefanie: Über die Beziehung zwischen Sonnenscheindauer und Bewölkungsgrad anhand Hamburger Daten.
- POPKE, Dagmar: Climate, climate change and the constraints on precipitation in a radiative-convective equilibrium version of ECHAM6.
- SELENT, Katharina: Last glacial maximum vegetation: results from simulations with the MPI earth System Model (MPI-ESM).
- WIESE, Mareike: Laboratory experiments on the thermodynamics of melting sea ice.
- WOLTER, Johanna: Parameterization of typical high northern wetland vegetation in a dynamic global vegetation model with their implications for the methane emissions of wetlands: Topic: Influence of wetland plant distribution on methane emissions

#### Diplomarbeiten

- ENGELS, Jessica: Seasonality of deforestation fires: a Modelling study with the global vegetation model JSBACH.
- KRUL, Biljana: Vergleichende Analyse von Modellergebnissen zur Schadstoffwolkenausbreitung in komplexen Geometrien.
- MARTENS, Michael: Untersuchung des Klimas der Norddeutschen Tiefebene mittels Datenanalyse und Downscaling.
- SCHMIDT, Julia: Untersuchung der turbulenten Vertikaltransporte an zwei scharfen Kaltfronten und einem markanten Schauer am Wettermast Hamburg.

- SCHÜTZE, Matthis: Squall Line und Niederschlagssimulation über Norddeutschland, Fallstudie vom 12.07.2010.

#### Bachelorarbeiten

- ABRAHAM, Carsten: The relation between circulation and energy flow biases over southern high latitudes.
- ASCHENBRENNER, Dennis: Vegetationsverschiebungen in Klimaszenarien.
- BEDBUR, Gesa: Wie genau kann die Temperatur in 2m Höhe über die Stabilitätsfunktionen aus der Temperatur in 10m Höhe berechnet werden.
- BUHR, Renko: Eine verbesserte Approximation der Kollisionsraten in einer 2-Momentenparametrisierung der Wolkenmikrophysik.
- BEUCHEL, Svenja: Kleinräumige Temperaturvariabilität in einem hamburgischen randstädtischen Gebiet.
- FISCHEREIT, Jana: Das Strömungs- und Turbulenzfeld in Wolkenstraßen bei abeisiger Strömung: Analyse von Flugzeugmessungen.
- GALFI, Vera Melinda: Analyse der globalen Wechselwirkungsfaktoren im Klimasystem des Holozäns.
- GÖTTSCHE, Frederik: Methodik der Abschätzung Windfeldbeeinflussung durch Topographie auf den Ertrag von Windkraftanlagen am Beispiel Bolund.
- HEIN, Carina: Vergleich von SODAR- und Sonic-Messungen für ein Jahr am Wettermast Hamburg.
- HEITMANN, Benjamin: Vergleich von vier Windmesssystemen am Hamburger Wettermast beim Tall Wind-Experiment vom 15. bis 20. Juni 2011.
- MÜLLER, Maximilian: Systematische Analyse von Strömungsmessungen im Nachlauf von Windkraftanlagen bezüglich statischer Turbulenzeigenschaften.
- MÜSSE, Jobst: Approaches to forecasting postfrontal precipitation events over the North Atlantic.
- MÜBLE, Lukas: Eine Warmfront über der Framstraße und ihre Wirkung auf das Meereis: Analyse der Flugzeug- und Bojenmessungen vom 5. März 2007.
- NATHER, Andree: Änderung der Wachstumsperiode der europäischen Vegetation durch globale Erwärmung: Gegenüberstellung von Beobachtungen und Ergebnissen aus CMIP5 Simulationen mit MPI-ESM-LR.
- NIESEL, Jonathan: Atmospheric response to the natural variability of the Atlantic

meridional overturning circulation on a decadal timescale.

ONKEN, Monika: Quantitative Bestimmung der Ventilationseigenschaften von Stadtstrukturen mit Hilfe systematischer Messreihen aus Windkanalversuchen.

ROSTOSKY, Philip: Clusteranalyse der Temperatur und Feuchte an Hamburger Messstationen.

SKALITZ, Ulrike: Konzeption und Aufbau eines Videoarchivs zur Dokumentation regionaler und lokaler Wetterphänomene.

SUDMEYER, Florian: Vergleich von vier Windmesssystemen am Hamburger Wettermast beim „Tall Wind“-Experiment vom 4. bis 9. Oktober 2011.

SCHULZ, Kira Vanessa: Validierung des Landoberflächenmodells JSBACH mit Hilfe des Hamburger Wettermastes.

STÄUDLE, Janina: Analysis of tropical precipitation measured on board of research ships and comparison with satellite data.

VOGE, Friederike: Analyse des Einflusses winddurchlässiger Baukörper auf die Schadstoffausbreitung in Stadtgebieten.

WEINER, Oliver: Projizierte Änderungen klimatischer Indizes abgeleitet aus Klimamodellsimulationen mit zielgruppenspezifischer Darstellung.

ZINK, Katharina: Modelltheoretische Abschätzung der holozänen und vorindustriellen terrestrischen Kohlenstoffspeicher.

---

Universität Hannover

---

*Dissertationen*

CORDERO, Raul: Monte Carlo-based techniques for uncertainly calculations and its applications.

KNIGGE, Christoph: Untersuchungen von atmosphärischen Gebirgsrotoren mit Hilfe von Laborexperimenten und Grobstruktursimulation.

*Masterarbeiten*

DRÜKE, Sonja: Der Einfluss von durch Wolken induzierte Schatten auf heterogenitätsbedingte Sekundärzirkulationen.

GÜNTHER, Robert: Einfluss von Bäumen auf das Stadtklima und die thermische Behaglichkeit - Simulationen mit einem mikroskaligen Modellsystem.

ROLOFF, Katharina: Untersuchung zur

Eignung wolkenmikrophysikalischer Parameter des numerischen Wettervorhersagemodells COSMO-EU zur Verweisungsprognose in ADWICE.

*Diplomarbeiten*

RICHART, Nora: Regionaler Klimawandel in Deutschland.

*Bachelorarbeiten*

BÖSKE, Lennart Nils: Entwicklung und Test eines positiv definiten Verfahrens für das Wicker-Skamarock-Advektionsschema.

FIEHN, Alina: Untersuchungen zu räumlichen und zeitlichen Schwankungen der Kohlenstoffdioxidkonzentration.

HOLST, Christopher C.: Transmission von Stoffproben – Entwicklung eines Versuchsaufbaus.

HUPE, Patrick: Untersuchungen des Weterinflusses auf Sektorbelastungen in der Flugsicherung.

IOV, Julia: Beobachtungen zu Oberflächentemperaturen für verschiedenen Stadtstrukturen.

ISENSEE, Katharina: Das Klima von Namibia: Analyse von Extremereignissen.

NIEDZWIEDZ, Angelika: Entwicklung einer Software zur Ansteuerung eines Hyperspektralradiometers.

PAWELLEK, Franziska: Analyse von Wolkenkameradaten.

POHL, Christine: Vergleichende Untersuchungen zur globalen, direkten und diffusen Bestrahlungsstärke.

RUSTEMEYER, Alexandra: Über den Klimawandel des Winterweizenbestandes in Ostwestfalen-Lippe.

QUADFLIEG, Esther: Eine Klimaprognose für Namibia. Eine Klimaprognose für Namibia.

SCHULZ, Hannes: LES of a simple block canopy and sensitivity studies with the vegetation model in PALM.

SIEDLER, Jasmin: Flugroutensimulation in postfrontalen Schauern.

VON HOLLEN, Ines: Untersuchungen zum Klima Hannovers mit lokalen Stationsdaten.

---

Universität Karlsruhe

---

*Dissertationen*

BANGERT, Max: Wechselwirkung von Aerosol und Wolken auf der regionalen bis kontinentalen Skala.

BORK-UNKELBACH, Annika: Land

surface temperature derived from satellite data: characterisation of validation sites and up-scaling of in-situ measurements to satellite spatial resolution.

GISI, Michael: Aufbau und Charakterisierung eines hochgenauen Sonnenverfolgers für die Fernerkundung der atmosphärischen Zusammensetzung mittels bodengebundener FTIR-Spektroskopie.

GRAMS, Christian: Untersuchung des Einflusses tropischer Wirbelstürme auf die Strömung der mittleren Breiten in hochauflösenden numerischen Modellrechnungen.

KELLER, Julia: Diagnosing the Downstream Impact of Extratropical Transition Using Multimodel Operational Ensemble Prediction Systems.

KOHLHEPP, Regina: Trendanalyse der Chlor-Reservoargase HCl und ClONO<sub>2</sub> aus FTIR-Messungen und KASIMA- und EMAC-Modellrechnungen.

LANG, Simon: Untersuchungen von singulären Vektoren für Ensemblevorhersagen bei der Umwandlung von tropischen Wirbelstürmen in Tiefdruckgebiete der mittleren Breiten.

MAHLKE, Holger: Untersuchung der auslösenden Faktoren für Konvektion beim COPS-Experiment.

NIEMAND, Monika: A Particle-Surface-Area-Based Formulation of Heterogeneous Ice Nucleation by Mineral Dust Aerosols.

*Diplomarbeiten*

ALTSTÄDTER, Barbara: Eigenschaften von Russpartikeln als Wolkenkondensationskeime am Schneefernerhaus gemessen mit einem Russphotometer.

BECK, Teresa: Adaptive Simulation idealisierter Wirbelsturm-Probleme.

BOHLINGER, Patrik: Werden die kalten Winter in der arktischen Stratosphäre immer kälter?

BROMBACH, Joris: Modifikation der Strömung über Mittelgebirgen und die Auswirkungen auf das Auftreten hochreichender Konvektion.

DAMIAN, Thomas: Messung des Windprofils an virtuellen Masten unter Anwendung des Dual-Doppler Verfahrens.

EHMANN, Christian: Vergleich der Entwicklung von Zyklonen mit Potenzial für Sturm und extreme Niederschlagsereignisse im Mittelmeerraum.

GÖLZ, Inga: Der Einfluss von Ruß auf den Atmosphärenzustand während der Hitzeperiode 2003 .

KUGEL, Petra: Anwendung verschiedener Verfahren zur Detektion von Hagel aus dreidimensionalen C-Band Radardaten.

KUTTIG, Miriam: Untersuchung von Gewitterzugbahnen im südwestdeutschen Raum anhand von Radardaten.

MAISENBACHER, Ruben: Entstehung und Erscheinungsformen bodennaher Konvergenzlinien in einem Ensemble mesoskaliger Modelle.

MARINA, Emanuel: Einfluss von Boden- und Grenzschichtparametern auf die Auslösung Hochreichender Konvektion.

NEUPER, Malte: Untersuchung der vierdimensionalen Entwicklung schwerer Einzelgewitter anhand von Radardaten.

RICHTER, Andrea D.F.: Untersuchungen zur Wechselwirkung tropischer Wirbelstürme mit Hilfe eines idealisierten dreidimensionalen numerischen Modells.

RIEGER, Daniel: Numerische Simulationen zur Wechselwirkung zwischen Aerosol und Wolken.

RIEHL, Andreas: Aufbau und Charakterisierung von Aerosolmessungen auf dem Schneefernerhaus (Zugspitze).

RÖHNER, Luisa: Hochaufgelöste 2D-Turbulenzmessung mit einem Dual-Doppler Lidar-System.

SCHAD, Tobias: Numerische Simulation des Einflusses künstlicher Seesalzemissionen auf Stratocumulusbewölkung im Sdostpazifik.

SEHLINGER, Arnulf: Charakterisierung des Einflusses der Initialisierung des Bodens auf mittelfristige Trends im Untergrund und in der Atmosphäre.

SPÄTH, Stephan: Thermische Windsysteme im westlichen Mittelmeerraum.

WINTZEN, Alexandra: Numerische Simulationen von anthropogenem und sekundärem Aerosol während des Ausbruchs des Eyjafjallajökull.

---

Universität Kiel

---

#### *Dissertationen*

BA, Jin: North Atlantic Multidecadal Variability Simulated in Coupled General Circulation Models (CGCMs).

TSENG, Wan-Ling: Role of ocean-atmosphere interaction for tropical climate variability over warm pool regions.

TORGE, Antje: Solar Monte Carlo Radiative Transfer Simulations in Saharan Dust Plumes.

ZOLL, Yann: Bestimmung des Flüssigwasserpfades auf See mit Hilfe der passiven Mikrowellenradiometrie.

#### *Masterarbeiten*

BIELIGK, Henning: VLS transport to the stratosphere during the DRIVE-POSEIDON campaign in the tropical East-Atlantic.

GLEIXNER, Stephanie: Southern Annular Mode response to volcanic eruptions in the MPI-ESM.

#### *Diplomarbeiten*

ACKERMANN, Ulrike: Darstellung von Wetterlagen im ECHAM5-Atmosphärenmodell.

BEHRENS, Lisa Katharina: Das arktische Meereis in Klimamodellen - Variabilitäten und anthropogener Klimawandel.

SIKORSKI, Thomas: Sommerniederschläge in Norddeutschland. Eine Analyse von Radar- und Stationsmessungen.

#### *Bachelorarbeiten*

HELL, Momme: Impact of Atlantic Sea Surface Temperature on Indian and Sahel rainfall in Kiel Climate Model.

KRATZSCH, Valentin: A linear equivalent barotropic Antarctic Circumpolar Current.

LANGE, Tom: Variabilität von extremen Sommerniederschlägen in Europa.

NISSEN, Cara: Wirbelstürme im Mittelmeer.

STEINIG, Sebastian: Mid-Cretaceous ocean circulation in the Kiel Climate Model.

---

Universität Köln

---

#### *Habilitationen*

LÖHNERT, Ulrich: Ground-based remote sensing for weather research and forecasting

SIMON, Sven: Moon-magnetosphere interactions and global magnetospheric dynamics at Saturn

#### *Dissertationen*

CARONE, Ludmila: Tidal Interactions of Short-Period Extrasolar Transit Planets with their Host Stars: Constraining the elusive Stellar Tidal Dissipation Factory

FOREMAN, Richard: Improved calculation of offshore meteorological parameters for application in wind energy

FRÖHLICH, Luise: Upper-level troughs and tropical plumes at low latitudes: Identification, climatology and their

impact on global moisture transport

ROTH, Lorenz: Aurorae of Io and Europa: Observations and Modeling

SEUFERT, Mario: Callisto: Induction Signals, Atmosphere and Plasma Interaction

WIDODO: Multidimensional Interpretation of Near Surface Electromagnetic Data Measured in Volvi Basin, Northern Greece

XIE, Xinxin: Polarized signals from oriented frozen hydrometeors using passive microwave radiometry

#### *Masterarbeiten*

DULING, Stefan: Magnetfeld-Randbedingung an der Oberfläche eines Nichtleiters bei magnetohydrodynamischen Simulationen.

GUTMANN, Heiko Amadeus Paul: Plasmawechselwirkung des Sonnenwindes mit Kometen.

HAROON, Amir: The Application of the Long Offset Transient Electromagnetic Method in Perekishkul, Azerbaijan.

KÖRTGEN, Bastian: Einfluss von elastischen Kollisionen auf die Plasmawechselwirkung zwischen Titan und Saturns Magnetosphäre.

MUSACCHIO, Fabrizio-Michele: Ionenzyklotronwellen im Saturnsystem.

SCHLEICHER, Christina: Wolken in Beobachtung und Modell an einer Station im Schwarzwald.

SEREGINA, Larisa: Untersuchungen zur räumlichen Variabilität von Verteilungsparametern der Windgeschwindigkeit zur Entwicklung einer Wind-Böe-Beziehung.

TUCHSCHERER, Yvonne: Erkundung der Sophienhöhle in Klausstein mit elektrischen und elektromagnetischen geophysikalischen Methoden.

WITTKKE, Jan: Eine neue gitterfreie Methode in der magnetotellurischen Modellierung.

#### *Diplomarbeiten*

SCHUSTER, Robert: Simulation von bodennahem kontinentalem Stratus im südlichen Westafrika während der AMMA SOP 2006 mit WRF.

ZETTL, Timo: Zweidimensionale, hochauflösende Geoelektrik und Radiomagnetotellurik an einer Verwerfung in Uden, Niederlande.

#### *Bachelorarbeiten*

BELLENBAUM, Nina: Serielles Cluste-

ring extratropischer Zyklonen  
 HAHN, Valerian: Target-Gravity Messungen mit dem Mars Express Radio Science Experiment über Olympus Mons.  
 KÜCHLER, Nils: Kalibration von Mikrowellenradiometern.  
 MARKE, Tobias: Detektion von dünnen Flüssigwasserwolken mit Hilfe neuartiger Infrarotradiometer.  
 STRAHL, Belinda: Analyse der Änderung des Jetstreams in den Jahren 1979-2011 im Zusammenhang mit dem Klimawandel.

---

Universität Leipzig

*Dissertationen*

BAARS, Holger: Aerosol profiling with lidar in the Amazon Basin during the wet and dry season 2008.  
 DENNIS, Niedermeier: Heterogeneous ice nucleation in droplets containing mineral dust particles: An experimental and theoretical study.  
 DIECKMANN, Katrin (geb. Mildenberger): Hygroscopic Growth and Activation Measurements of Aerosol Particles in Lab and Field.  
 OTTO, Sebastian: Optische Eigenschaften nichtkugelförmiger Saharamineralstaubpartikel und deren Einfluss auf den Strahlungstransport in der Erdatmosphäre.

*Masterarbeiten*

AUGUSTIN, Stefanie: Immersionsgefrüverhalten biologischer Partikel am Leipzig Aerosol Cloud Interaction Simulator (LACIS).  
 BLEY, Sebastian: Vergleich zweier Schwellwertalgorithmen zur Wolken detektion in solaren METEOSAT SEVIRI Bildern und Anwendung auf den hochaufgelösten sichtbaren Kanal.  
 FISCHER, Stephan: WRF-Simulation zur Quantifizierung der Invarianzeigenschaften der Ertel'schen potentiellen Vortizität während der Entwicklung einer Zyklone bei einer Vb Wetterlage.  
 FOTH, Andreas: Bestimmung der vertikalen Aerosolverteilung über Punta Arenas, Chile (53.2°S, 70.9°W).  
 FYTTERER, Tilo: Analyse solarer Gezeiten und sporadischer E-Schichten.  
 HEYNER, Frank: Bestimmung der räumlich aufgelösten optischen Dicke von inhomogenen Zirren durch Messungen mit einem abbildenden Spektrometer.

HOFF, Michael: Ein Laborexperiment für meteorologische Anwendungen: Optimale Störungen für reguläre und irreguläre barokline Strömungen.  
 HÖPNER, Friederike: Messung des hygroskopischen Wachstums von submikronen Aerosolpartikeln in der marinen Grenzschicht des Atlantischen Ozeans.  
 JUNGHÄNEL, Thomas: Konzeptuelle Grundlagen einer Hagelklimatologie für den Freistaat Sachsen.  
 OELSNER, Peter: Aufbau eines High-Spectral-Resolution-Kanals und Vergleich mit dem Raman-Kanal eines Aerosol-Lidars.  
 PFITZENMAIER, Lukas: Determination of microphysical properties of cloud and drizzle droplets based on observations with radar, microwave radiometer, and lidar.  
 WAGNER, Janet: Microphysical aerosol properties retrieved from combined lidar and sun photometer measurements.  
 WENZEL, Julia: Optische Eigenschaften des Aerosols in der atlantischen maritimen Grenzschicht. Ein Querschnitt von Kapstadt bis Bremerhaven.  
 WOLF, Veronika: Überblick über 5 Jahre schiffsgebundener Fernerkundungsbeobachtungen der Atmosphäre über dem Atlantischen Ozean.

---

Universität Mainz

*Dissertationen*

CAMPA, Jana: Potential vorticity and moisture in extratropical cyclones: climatology and sensitivity experiments.  
 FLORES, Jorge Michel: Laboratory study on the optical properties of absorbing atmospheric aerosols and field applications.  
 GLATT, Ilona: Automatische objektive Identifikation und Berechnung der Eigenschaften von Rossbywellenzügen.  
 MÜLLER, Andreas: Untersuchungen zur Genauigkeit.

*Diplomarbeiten*

EIERMANN, Sven: Eine Untersuchung stromabwärts induzierter Effekte extratropischer Umwandlungssysteme mit Hilfe von Q-Vektor-Partitionierung.  
 GEHLEN, Mara: Untersuchung der Bereifung von Beschichtungen für Windkraftanlagen.  
 PANKATZ, Klaus: Evaluation der Vorhersagequalität des Chemie-Klimamodells

EMAC: Betrachtung wichtiger meteorologischer Parameter als erster Schritt in Richtung einer operationellen chemischen Wettervorhersage.  
 SCHLENCZEK, Oliver: Automatische Identifikation von Gewitterformen aus Radardaten.  
 UNGELENK, Judith: Experimentelle Simulation von Wolkenbildungs- und Wachstumsprozessen mithilfe der AIDA Wolkenkammer.  
 VOIGT, Matthias: Dynamik von Bannerwolken: Idealierte Studien mit einem Grobstruktursimulationsmodell.  
 VON SCHUMANN, Jonas: Simulation trockener Deposition in einem mikroskaligen Modell der Atmosphäre.

*Bachelorarbeiten*

BAUMGART, Marlene: Fallstudien stromabwärts induzierter Effekte von tropischen Wirbelstürmen mittels Q-Vektor-Aufteilung.  
 LESCHNER, Martin: Horizontale Feuchtegradienten und Ausdehnungen von eisübersättigten Regionen.  
 SCHLÜTER, Andreas: Variabilität des Energie- und Kohlenstoffhaushaltes eines indonesischen Bergregenwaldes.  
 STIPP, Christa: Untersuchungen zur Vorhersagbarkeit von Rossby-Wellenzügen mittels Ensemble-Vorhersagen.  
 MÖLLINGER, Britta: Flugzeugmessungen bei der Feldmesskampagne PARADE.  
 PEINKE, Isabel: Tropopauseninversionschicht und eisübersättigte Regionen.  
 SCHAPPERT, Sebastian: Persistenz meteorologischer Parameter in ausgewählten Zeitreihen in Deutschland.  
 WEHNER, Vanessa: Klimatologie von Rossbywellenzügen im Reanalysedatensatz ERA 40.  
 WRAGE, Christian: Bestimmung der Ladungsverteilung eines Röntgen-Aerosolneutralisators.

---

Universität München

*Dissertationen*

DAHLMANN, Katrin: Eine Methode zur effizienten Bewertung von Maßnahmen zur Klimaoptimierung des Luftverkehrs.  
 KOX, Stephan: Remote sensing of the diurnal cycle of optically thin cirrus clouds.  
 PFEIFFER, Andreas: Regional climate modeling in the European Alpine

region with focus on simulated precipitation and subsequent hydrology.

- RUNDE, Theresa A.: Ursachen und Wirkung der dynamischen Kopplung von Stratosphäre und Troposphäre.  
 SCHÄFLER, Andreas: Investigation of the Warm Conveyor Belt Inflow a combined approach using airborne lidar observations and ECMWF model simulations.

#### *Masterarbeiten*

- EWALD, Florian: Implications of clouds geometry for the remote sensing of particle size profiles.  
 FOLGER, Katrin: Height Correction of Atmospheric Motion Vectors with Airborne Lidar Observations.  
 FORSTER, Linda: Retrieval of Water Cloud Optical Properties Using Ground-based Polarimetric Measurements.  
 HAUSMANN, Petra: Ground-based remote sensing of optically thin ice clouds.  
 KHAIYOUN, Abdul: Verification of Probabilistic Precipitation Forecasts with COSMO-DE-TLE  
 KONETSCHNY, Nina: The changes in stratospheric water vapor content and its reasons.  
 LAINER, Martin: Numerical simulations of long-lived contrails with Lagrangian microphysics.  
 MERK, Daniel: Detection and Nowcasting of Convective Initiation using Meteosat Observations.  
 PLATIS, Andreas: Large-eddy Simulation of the Maritime Arctic Boundary Layer – An IPY-THORPEX Case Study.  
 REITER, Anja: First airborne SO<sub>2</sub> Measurements in the West Pacific using IT-CIMS: Analysis of Regional Distribution, Sources and Transport.  
 RICHTER, Bettina: Non-divergent image for verification of weather forecasts.  
 RISO, Silvia: Polarisation Measurements of Clouds – Photographs and Simulations.  
 SCHAAF, Benjamin: Comparison of different Ceilometers with respect to the detection of aerosolparticles.  
 SCHRÖTTLE, Josef: Turbulence structure in a porous multifractal forest under varying atmospheric conditions.  
 SIRCH, Tobias: Contributions to an aerosol climatology for Munich using Lidar observations.

#### *Diplomarbeiten*

- GEIß, Alexander: Kalibrierung des Jenop-

tik Ceilometers CHM15kx zur Messung von Aerosol-Rückstreuprofilen.

- REIGERT, Andrew: Tagesgang der atmosphärischen Grenzschicht.  
 VELLINGER, Martin: Statistische Auswertung von Ensemble Wettervorhersagen am Flughafen München.

---

#### Technische Universität München

---

#### *Dissertation*

- JOCHNER, Susanne: Environmental responses of phenology and allergenic pollen to recent climate change and urbanisation.

#### *Masterarbeiten*

- GUBO, Sonja: Receptor modelling of non-methane hydrocarbons at the Global Atmosphere Watch Observatory Hohenpeißenberg.  
 HALBAUER, Patrick: Auswirkung von Klimaextremen auf die Höhen- und Durchmesserentwicklung internationaler Provenienzen der Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.).

---

#### Universität Graz

---

#### *Masterarbeiten*

- WIESAUER, Nora: Potentiale der Wind- und Sonnenenergie in der Steiermark basierend auf Daten meteorologischer Leitstationen.  
 JURY, Martin: Evaluation of Global Climate Models as Regional Climate Model drivers.  
 MOHR, Manuel: Solar Irradiance Measurement at the University of Graz.  
 NACHTNEBEL, Manfred G.: Ermittlung von Emissionsfaktoren für diffuse Staubemissionen von unbefestigten Fahrwegen und des Emissionsminderungspotentials des Mittels CMA+.

#### *Diplomarbeiten*

- HAGER, Benedikt: Stable Isotope Composition of Precipitation - A Record from the Meteorological Station Graz-University.  
 SCHWARZ, Jakob: Potential Systematic Errors in Radio Occultation Climatologies due to Irregular Distributions of Apparent Outliers in the Retrieval Process.

#### *Bachelorarbeiten*

- DEFNER, Beppino: Methoden der quanti-

tativen Klimamodellierung.

- LENZ, Martin: Tropische Wirbelstürme.

---

#### Universität Innsbruck

---

#### *Dissertationen*

- BIPPUS, G.: Characteristics of summer snow areas on glaciers observed by means of Landsat data.  
 HOFER, M.: Statistical downscaling of atmospheric variables for data-sparse, glaciated mountain sites. Shafiq Muhammad: Modelling runoff and glacier melt in the Hunza basin in northern Pakistan using satellite remote sensing techniques.  
 SHAFIQ, Muhammad: Modelling runoff and glacier melt in the Hunza basin in northern Pakistan using satellite remote sensing techniques.

#### *Masterarbeiten*

- BILSTEIN, Meike: Analyse der 24h-, 28h- und 72h-Leistungsprognosen von verschiedenen onshore Windparks.  
 DIETZ, Sebastian: Untersuchung charakteristischer Lebenszyklen von eisübersättigten Regionen in der oberen Troposphäre.  
 MITTERER, Christian: Indirekte Bestimmung der Ablation mittels digitaler Photogrammetrie (Hornkees, Zillertaler Alpen).  
 REIF, Matthias: Inner-Core Vacillation Cycles of Hurricane Katrina in a Non-Hydrostatic Model.

#### *Diplomarbeiten*

- BACKMANN, Michael: Unterschiede zwischen Okklusionen in Norwegerzyklonen und Seklusionen in Hammerkopfzyklonen.  
 BARTENSTEIN, Harald: Auswirkung der diapyknischen Vermischung auf die Stabilität des atlantischen Overtunnings.  
 BEYER, Elisabeth: Trendanalyse des Niederschlags und der Temperatur von Tiroler Wetterstationen im Zeitraum von 1953 bis 2007.  
 BRUGGER, Harald: Spatial Variability of Turbulence Statistics in Complex Terrain: A study based on the MAP Riviera Project.  
 GROLL, Christian: Diapyknisches Mischen und die physikalische Kohlenstoffpumpe in einem Boxmodell der „Meridional Overturning Circulation“.  
 PRANTL, Sara: Temporal and Spatial Va-

riability of Degree-Day Factors at Ablation Stakes on Hintereisferner  
 RIPPER, Elisabeth: Snow Cover Monitoring with Microwave Radiometry over the Canadian Prairies.  
 STEMBERGER, Klemens: Atmosphärische Deposition in Tirol.

---

Universität Wien

---

*Diplomarbeiten*

ASCHAUER, Isabella: Vergleichende Untersuchung von Wetterlagen und Ableitungen des Bodendruckfeldes im Hinblick auf Niederschlagsereignisse.  
 BUGKEL, Johanna: Energie-Casimir-Normen zur Störungsgenerierung in Ensemblevorhersagen.  
 KUMER, Valerie-Marie: Analysis of lidar wind measurements at the Bruck an der Leitha wind park.  
 LEUKAUF, Daniel: A simulation of an undular Bore over the Gulf of Mexico.  
 RAUSCH, Johannes: Kurzfristvorhersage konvektiver Ereignisse im Alpenraum mittels Radarassimilation in WRF-3DVAR.  
 RIEGER, Claudia: BIAS-Korrektur von Windprognosen.  
 ROTHMÜLLER, Maria: Temporal trends of ion concentration and deposition in

high alpine snowpacks 1983 – 2011.  
 SACHSPERGER, Johannes: Study of the atmospheric wake of Madeira Island.  
 SCHÖBERL, Julia: Vergleich thermodynamischer Größen.  
 TÜCHLER, Lukas: Niederschlagsmessungen mit hochaufgelöstem in-situ-Messnetz und Fernerkundungsmethoden während COPS.  
 UMDASCH, Sarah: Untersuchung der Eigenschaften ausgewählter Verifikationsmaße anhand hochauflösender NWP Modellvorhersagen während MAP D-PHASE.

---

Universität Zürich

---

*Dissertationen*

ARFEUILLE, Florian: Large historical volcanic eruptions: Impact on the stratosphere and climate.  
 BICHET, Adeline: Global and European climate response to transient forcings since 1870, as simulated in an atmospheric global circulation model.  
 CIRISAN, Ana: Lagrangian Perspective of Modelling and Measurements of Natural and Geengineered Cirrus Clouds.  
 FRICK, Claudia: The numerical modeling of wet snowfall events.

GIANINI Matthias: Chemical composition and source apportionment of atmospheric PM10 in Switzerland.  
 KNOTE, Christoph: Regional scale impacts of changing anthropogenic emissions on aerosols.  
 LANGHANS Wolfgang: Multiscale aspects of cloud-resolving simulations of moist summer convection over complex terrain.  
 LORENZ, Ruth: Influence of soil moisture and vegetation phenology on recent European heat waves.  
 LUSTENBERGER, Andreas: Relating European temperature extremes to trends in mean temperature.  
 MÜLLER, Brigitte: Evapotranspiration and terrestrial water storage in the global climate system.  
 PINTI, Valeria: Heterogeneous ice formation on mineral and volcanic dust particles.  
 SANT, Vivek: A New Two Moment Collision-Coalescence Parameterization for Simulating Drizzling Stratiform Clouds.  
 SCHALLER, Nathalie: The global hydrological cycle and energy budget under climate change.  
 WELTI, André: Experimental Studies on Deposition and Immersion Mode Ice Nucleation on Mineral Dust.

**Adressen der Autoren dieses Heftes**

DIPL.-MET. DANNY DANIEL  
Kommando Streitkräftebasis  
Referat GeoInfoWesen  
Fontainengraben 150  
53123 Bonn  
DannyDaniel@bundeswehr.org

DR. THOMAS GERZ  
Institut für Physik der Atmosphäre  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Münchner Straße 20  
82234 Oberpfaffenhofen  
Thomas.gerz@dlr.de

PROF. DR. THOMAS HAUF  
Institut für Meteorologie und Klimatologie  
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
Herrenhäuser Str. 2  
30419 Hannover  
hauf@muk.uni-hannover.de

DIPL.-MET. RENÉ HEISE  
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr  
Gruppe Meteorologie beim DWD  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach/Main  
Rene.Heise@dwd.de

DR. MARKUS KERSCHBAUM  
Austro Control, Österreichische Gesellschaft für Zivilluftfahrt  
Abteilung Meteorologie  
Schnirchgasse 11  
A-1030 Wien  
markus.kerschbaum@austrocontrol.at

DIPL.-MET. SVENJA KOOS  
Deutscher Wetterdienst  
Abteilung Flugmeteorologie – Projektkoordination  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach am Main  
Svenja.Koos@dwd.de

DR. SIGRUN MATTHES  
Institut für Physik der Atmosphäre  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Münchner Straße 20  
82234 Oberpfaffenhofen  
sigrun.matthes@dlr.de

DR. HERBERT PÜMPEL  
Chief, Aeronautical Meteorology Division, and  
Officer in Charge, WMO Quality Management Framework  
Weather and Disaster Risk Reduction Services Department  
World Meteorological Organization  
Avenue de la Paix 7 bis  
CH-1211 Geneve  
Switzerland  
hpuempel@wmo.int

MANFRED RIEDIGER  
Deutscher Wetterdienst  
Luftfahrtberatungszentrale Süd  
Terminal Straße Mitte 18, MAC Nord  
85356 München  
Manfred.Riediger@dwd.de

M.SC. MANUELA SAUER  
Institut für Meteorologie und Klimatologie  
Leibniz Universität Hannover  
Herrenhäuser Str. 2  
30419 Hannover  
sauer@muk.uni-hannover.de

PROF. DR. ROBERT SAUSEN  
Institut für Physik der Atmosphäre  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)  
Münchner Straße 20  
82234 Oberpfaffenhofen  
robert.sausen@dlr.de

KLAUS SIEVERS  
Arbeitsgruppe Flugsicherung  
Vereinigung Cockpit e.V.  
Main Airport Center (MAC)  
Unterschweinstiege 10, 6. OG  
60549 Frankfurt

MARTIN STREICHER  
Deutscher Wetterdienst  
Abteilung Flugmeteorologie – Referat WV22  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach  
Martin.Streicher@dwd.de

DIPL.-MET. KLAUS STURM  
Deutscher Wetterdienst  
Abteilung Flugmeteorologie  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach  
klaus.sturm@dwd.de

DIPL.-MET. DIETMAR THIEL  
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr  
Gruppe Meteorologie beim DWD  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach/Main  
dietmar.thiel@dwd.de