

Luftverkehr und Wetter

Statuspapier Juni 2004



Verfasser und Herausgeber:

Thomas Hauf

Universität Hannover

Herbert Leykauf

Deutscher Wetterdienst

Ulrich Schumann

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Prof. Dr. Thomas Hauf	Institut für Meteorologie und Klimatologie Universität Hannover Herrenhäuser Straße 2 30419 Hannover
Dr. Herbert Leykauf	Deutscher Wetterdienst Geschäftsfeld Luftfahrt 63067 Offenbach
Prof. Dr. Ulrich Schumann	Institut für Physik der Atmosphäre Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Oberpfaffenhofen 82234 Weßling

Abbildung erste Seite: Eisansatz an der Flügelvorderkante einer DO-128 des DLR während eines Meßfluges zur Untersuchung der Flugzeugvereisung während der EURICE-Meßkampagne. Aufnahme von unten; im Bild rechts die Triebwerksgondel. Foto: T. Hauf.

Zusammenfassung

Wetter zählt unbestritten zu den bedeutendsten Störfaktoren des Luftverkehrs. Es gefährdet die Sicherheit und senkt die Wirtschaftlichkeit des gesamten Luftverkehrs einschließlich der Flughäfen. Die störende Wirkung der einzelnen Wetterereignisse hängt dabei von mehreren nicht-meteorologischen Faktoren ab und variiert mit diesen in einer uneinheitlichen Weise. Solche Faktoren sind: Phase des Fluges (Start, en-route, Landung), Region, Flughafen, Jahreszeit, sowie Verkehrsdichte und Auslastung eines Flughafens. Für die USA ist der Wettereinfluß auf den Flugverkehr schon intensiv untersucht worden, nicht so für Deutschland und Europa. Hier liegen erst wenige Studien vor. Der weltweit zunehmende Flugverkehr macht es jedoch erforderlich, auch hier den Wettereinfluß zu untersuchen. Der Arbeitskreis *Luftverkehr und Wetter* hat sich dies zum Ziel gesetzt und gibt mit diesem Statusbericht einen ersten Überblick über die Situation in Deutschland. Damit soll eine Voraussetzung für eine konzertierte Vorgehensweise aller am Luftverkehr beteiligten interessierten Gruppen aus Forschung und Industrie zusammen mit dem Wetterdienst geschaffen werden.

Nach einer Erläuterung der Zielsetzung in Kapitel 1 werden in Kapitel 2 die einzelnen Wetterfaktoren ausführlich präsentiert und ihre Wirkung auf den Flugverkehr erläutert. Kapitel 3 untersucht, in umgekehrter Wirkungsrichtung, die Auswirkungen des Luftverkehrs auf die Umwelt. Kapitel 4 stellt die Fakten zum Wissensstand des Wettereinflusses auf den Flugverkehr dar. Die Situation in Deutschland wird in Kapitel 5 vorgestellt, während der internationale Aspekt in Kapitel 6 diskutiert wird. Der Änderungsbedarf, der sich aus dem bisher Gesagten ergibt, wird schließlich im letzten Kapitel 7 dargelegt.

Insgesamt stellt der Statusbericht einen aktuellen Überblick über die bisher wenig untersuchte Problematik des Wettereinflusses auf den Flugverkehr dar. Eine wesentliche Schlußfolgerung ist, daß auch in Deutschland der Wettereinfluß signifikant ist und auf breiter Basis untersucht werden sollte. Es wird vorgeschlagen, geeignete Vorhersageprodukte zusammen mit den späteren Nutzern zu entwickeln und in die Luftverkehrssteuerung einzubinden, so daß unnötige Verspätungen vermieden, Kosten gesenkt und die Sicherheit erhöht werden können.

Das Statuspapier wurde im Rahmen des Arbeitskreises *Luftverkehr und Wetter* erarbeitet und beim 3. Fachgespräch des Arbeitskreises im Juni 2004 diskutiert und nach kleineren Korrekturen verabschiedet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Inhaltsverzeichnis	4
1. Motivation	5
1.1. Ausgangslage	5
1.2. Zentrale Fragen	7
1.3. Ziele des Statuspapiers	9
2. Die Wetterfaktoren	10
2.1. Starkwind, Wind und Windscherung	10
2.2. Turbulenz	11
2.3. Flugzeugvereisung	12
2.4. Sichtweite	14
2.5. Niederschlag	15
2.6. Schnee und Eis	15
2.7. Gewitter	16
2.8. Vulkanasche und Sandstürme	20
3. Auswirkungen der Luftfahrt	22
3.1. Wirbelschleppen	22
3.2. Fluglärm	24
3.3. Kondensstreifen	24
3.4. Gas- und partikelförmige Emissionen	25
4. Wettereinfluß auf den Flugverkehr - Fakten	26
4.1. Erkenntnisse zum Wettereinfluß	26
4.2. Einzelstudien in Deutschland	29
4.3. Österreichische Studie für Wien	31
5. Situation in Deutschland	32
5.1. Gesetzliche Grundlagen	32
5.2. Produkte und Leistungen des Deutschen Wetterdienstes für die Luftfahrt	33
5.3. Weitere Aktivitäten	34
6. Europäisches und internationales Umfeld: Tendenzen und Programme	37
6.1. ICAO	37
6.2. EUROCONTROL	37
6.3. Europäische Kommission	38
6.4. Die Europäische Luftfahrtindustrie	39
6.5. Die Situation in den USA	39
6.6. Wirbelschleppenforschung und Entwicklung von Wirbelschleppenwarnsystemen	42
6.7. World Area Forecast Centre (WAFC) London	43
7. Änderungsbedarf	45
7.1. Identifizierte Probleme und artikulierter Bedarf	45
7.2. F & E - Bedarf	45
7.3. Zielfelder oder Querschnittsaufgaben	46
7.4. Produkte	47
Produkte mit hoher Priorität auf nationaler Ebene.	47
Produkte mit mittlerer Priorität auf nationaler Ebene	48
Produkte ohne Relevanz auf nationaler Ebene	49
7.5. Einbindung der Aktivitäten in das nationale, europäische und internationale Umfeld	49
8. Glossar	50
9. Literatur	53
9.1. Allgemein	53
9.2. Weitere Literatur: Vulkanasche	55
9.3. Weitere Literatur: Kondensstreifen	56
9.4. Weitere Literatur: Wirbelschleppen	57

1. Motivation

Wetter beeinflusst sowohl die Sicherheit, als auch die Wirtschaftlichkeit und Pünktlichkeit des Luftverkehrs. Der Umfang dieser Beeinflussung ist auf internationaler Ebene nur in den USA hinreichend untersucht worden und wird dort auf einige Milliarden US\$ jährlich geschätzt. Es ist allgemein klar, daß das Wetter nicht verändert werden kann und daß man vielmehr mit dem Wetter leben muß. Für den Luftverkehr bedeutet dies, daß die Vorhersage der einzelnen störenden Wetterereignisse verbessert und Informationen über das gegenwärtige und zukünftige Wetter in die Verkehrssteuerung eingebunden werden müssen, so daß die Wetterrisiken vermindert und der störende Einfluß reduziert oder vermieden werden kann. Diese Vorgehensweise läßt, wiederum basierend auf den amerikanischen Untersuchungen, eine Reduktion der wetterbedingten Unkosten um 10 bis 40% erwarten. Angesichts des stetig wachsenden Luftverkehrs und des damit auch wachsenden Wettereinflusses ein lohnendes Ziel !

In diesem Statuspapier wird die Situation in Deutschland untersucht, mit der internationalen Situation verglichen und der resultierende Veränderungsbedarf dargestellt. Damit soll eine Voraussetzung für eine konzertierte Vorgehensweise aller am Luftverkehr beteiligten interessierten Gruppen aus Forschung und Industrie zusammen mit dem Wetterdienst geschaffen werden.

1.1. Ausgangslage

Der Luftverkehr nimmt nach allgemeinen Schätzungen weltweit zu, wobei man bis 2015 gegenüber 1998 eine Verdopplung erwartet (*Air Transport Action Group*,

2000). Der Anteil Europas am internationalen Passagieraufkommen bewegt sich bei etwas über 50%. Die mittlere jährliche Wachstumsrate in Deutschland bis 2015 liegt dieser Studie nach bei 4,4%, was gleichbedeutend mit einem Zuwachs von 114 Millionen Passagieren ist. Die Gründe für das starke internationale Wachstum werden in der Fortsetzung des bisherigen Trends, in der Globalisierung, in der zunehmenden ökonomischen Aktivität und in der Kostensenkung in der Luftfahrt gesehen.

Die Auswirkungen der Anschläge am 11. September 2001 in Kombination mit einem reduzierten weltweiten Wirtschaftswachstum, einem weiteren starken Kostendruck auf die Fluggesellschaften und die Umstrukturierung des Luftverkehrsmarktes sind noch nicht abgeschlossen. Trotz der derzeitigen wirtschaftlichen Probleme im Bereich des Luftverkehrs wird jedoch der langfristige Trend eines stetig wachsenden Luftverkehrsaufkommens als ungebrochen erachtet.

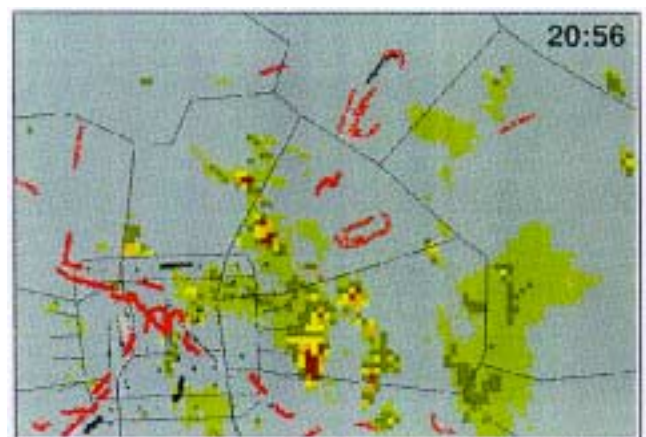


Abbildung 1.1: Karte mit dem Flughafen Dallas/Ft. Worth links unten, darauf von rechts zuziehende Gewitter (Radarreflektivität in gelb und grün) und 1-Minuten Spuren landender und startender Flugzeuge. Einige Flugzeuge versuchen die Gewitterfront zu durchqueren, kehren aber um, andere müssen sie weiträumig umfliegen.

Da die Nachfrage nach Flügen die Kapazität übersteigt – dies gilt sowohl weltweit als insbesondere auch an den hochfrequentierten Flughäfen Frankfurt, München und Düsseldorf in Deutschland (Air Transport Action Group, 2000) –, nimmt die Störanfälligkeit des Verkehrssystems Luftverkehr weiter zu (*Study on Constraints of Growth*, ECAC & EUROCONTROL, March 2001), wobei generell die Verspätungen nichtlinear mit der Zahl der Flugbewegungen zunehmen (Lenoir und Hustache, 1997).

Wetter zählt unbestritten zu den bedeutendsten Störfaktoren des Luftverkehrs, wobei der Wettereinfluß auf Unfälle und Verspätungen qualitativ und quantitativ sehr verschieden sein kann. Denn wie stark Verspätungen im Flugverkehr auf das Wetter zurückzuführen sind, hängt von vielen Faktoren ab, wie z.B. der Stärke des Wetterphänomens selbst, von Jahreszeit und Ort aber auch von der Auslastung des Flughafens, und läßt sich nicht auf einfache Art und Weise erfassen. Die vielfach beobachtbaren uneinheitlichen Ergebnisse quantitativer Verspätungsanalysen sind häufig auf methodische Unterschiede in der Erhebung der Verspätungsursachen zurückzuführen.

So werden beispielsweise von der Deutschen Flugsicherung mittlere Standardflugprofile zugrunde gelegt und die Abweichungen davon zur Qualitätsbestimmung (*qualities*) verwendet, während Fluggesellschaften Differenzen zu den geplanten Abflug- und Ankunftszeiten bei der Berechnung von "Pünktlichkeiten" benutzen. Verspätungsmaße sind wichtige Größen der Qualitätsbemessung und -sicherung und orientieren sich daher an Verantwortlichkeit, Zuständigkeit und Interessenlage der Betroffenen wie Flughafenbetreiber, Fluggesellschaften oder Passagiere. Eine

einheitliche Maßzahl zur Quantifizierung des Wettereinflusses auf den Flugverkehr gibt es daher nicht.

Diese Problematik ist identisch mit der der allgemeinen Bemessungen des Wettereinflusses auf die Gesellschaft (Pielke & Carbone, 2002). Einige Zahlen zur Verdeutlichung: EUROCONTROL gibt als Verspätungsursache für ATFM Verspätungen im Februar 2002 das Wetter mit 22,3% an, für *en-route* nach IATA Verspätungscode 73,2% und für wetterbedingte Verspätungen am Zielflughafen (Code 84) 20,4% an. (EUROCONTROL, CODA Monthly Report, Februar 2002). Die monatliche Statistik der DFS¹ für den Dezember 2002 weist beispielsweise für die oben genannten Flughäfen Wetter als Verspätungsursache zu 56%, 77% und 76% aus. In einer Untersuchung an deutschen Flughäfen (Spehr, 2003) konnte gezeigt werden, daß nach Abzug nicht wetterbedingter Faktoren wie Streik und Systemausfall 50% der Schwankung der täglichen Pünktlichkeitswerte durch lokales Wetter am Zielflughafen erklärt werden, wobei die mittlere Abweichung nur ~5% beträgt.

Eine von Boeing beauftragte Studie (in *Aviation Week* vom 26.8.2002, siehe Abbildung 1.2) besagt, daß die zwischen 1987 und 1996 weltweit registrierten Flugzeugunfälle mit tödlichem Ausgang (*accidents*) hauptsächlich durch Kollision mit Gelände (CFIT, *controlled flight into terrain*) und durch Verlust der Flugzeugkontrolle (*loss of control in flight*) bedingt waren. Auch sind Wettereinflüsse (*ice/snow, wind shear*) als direkte Ursache für 8 tödliche Unfälle (aus der Gesamtheit von 137) erkannt worden. Betrachtet man Vorfälle (*incidents*) mit der Ursache „Verlust der Flug-

¹ Die aktuelle Verspätungsstatistik der DFS kann über <http://www.dfs.de> (suche „ATFM delay report“) abgefragt werden.

zeugkontrolle“, so werden bei einem Drittel solcher Zwischenfälle Wirbelschleppen (*wake turbulence*) als Ursache genannt, gefolgt von schwerer Turbulenz und Flugzeugvereisung, sowie etwas nachrangig Windscherung und Fallwinde (*downbursts, microbursts*).

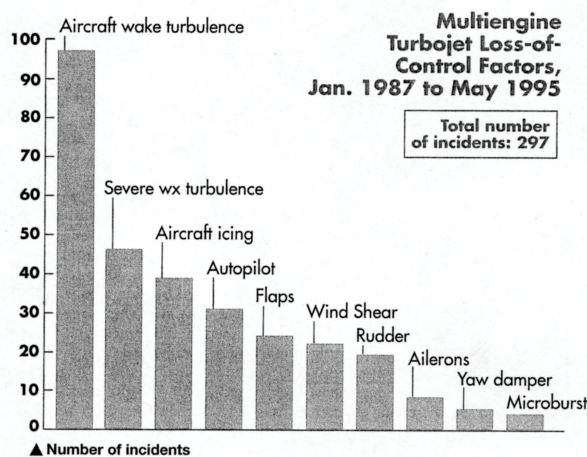
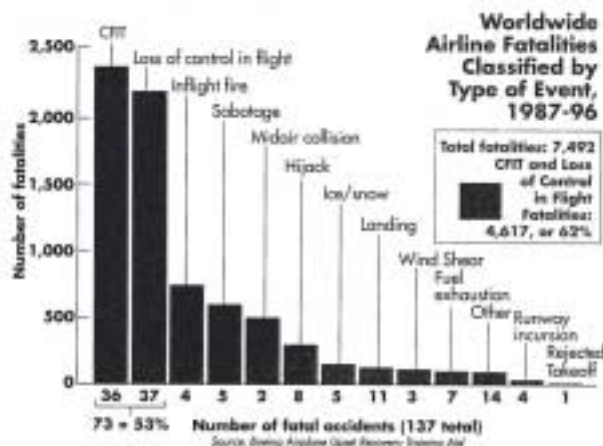


Abbildung 1.2: Ursachen von Flugzeugunfällen mit tödlichem Ausgang (links) und Ursachen für Zwischenfälle, die zu einem Kontrollverlust des Flugzeuges führten (rechts); Boeing-Studie zitiert in Aviation Week vom 26.8.2002, S.50.

Ohne auf die quantitativen Angaben einzugehen, lassen sich aus dieser und weiteren Unfalluntersuchungen sowie Verspätungsanalysen folgende Wettereinflußfaktoren zweifelsfrei identifizieren (Reihenfolge ohne Wichtigung):

- Gewitter, mit Hagel, Blitzschlag, Scherwinden, starken Abwinden, Starkregen, Vereisung, Tornados, Turbulenz, über oder nahe Gewittern angelegte Schwerewellen
- Eis und Schnee am Boden
- Vereisung im Flug (*in-flight icing*) und am Boden (*ground icing*)
- Starkwinde
- Windscherung und Windrichtungsänderungen, Fallwinde
- geringe Sicht (Dunst und Nebel) und niedrige Wolkenuntergrenze
- Turbulenz, in Wolken, in Bodennähe und als *clear-air turbulence* (CAT)
- Vulkanasche als nicht unmittelbares Wetterphänomen, aber stark vom Wetter bestimmtes Problem.

Von zunehmendem Interesse für alle an der Luftfahrt Beteiligten sind auch wetterabhängige Auswirkungen des Luftverkehrs auf den Verkehr selbst und auf die Umwelt wie

- Wirbelschleppen,
- Kondensstreifen,
- Lärm und
- luftchemische Umweltbelastung.

Diese Wirkungsfaktoren müssen in Zukunft sicherlich stärker als bisher überwacht und vorhergesagt werden.

1.2. Zentrale Fragen

Ausgangspunkt ist die Feststellung:

Wetter beeinflusst

- die Sicherheit und
- die Effizienz, d.h. die Wirtschaftlichkeit und Pünktlichkeit, des Flugverkehrs.

Die zentralen Fragen lauten daher:

- (1) Wie groß ist der Wettereinfluß auf den Flugverkehr? Welche Wetterphänomene wirken wie stark auf Flugplanung und Flugdurchführung, auf Flugführung und Flugverkehrsmanagement, auf Flughäfen und die insgesamt benötigte Infrastruktur?
- (2) Wie kann generell der Wettereinfluß auf den Flugverkehr vermindert werden?
- (3) Durch welche Maßnahmen können Sicherheit und Effizienz des Luftverkehrs gesteigert werden?

Die zugrunde liegende zentrale Arbeitshypothese dabei ist:

Ein maßgeblicher, aber noch zu bestimmender Anteil der wetterbedingten Effizienzverluste läßt sich durch eine verbesserte Kenntnis und Vorhersage der für den Luftverkehr relevanten Wetterphänomene und eine verbesserte Integration dieser Information in die gesamte Flugverkehrssteuerung vermeiden.

In anderen Worten:

Eine Reduktion der wetterbedingten Kosten und Risiken ist möglich durch

- (1) Verbesserung der Wetterinformationen (Analyse und Vorhersage),
- (2) gezielte Nutzung der Wetterinformationen durch das *Air Traffic Management*.

Die oben genannten Verspätungszahlen belegen, daß auch in Deutschland Wetterauswirkungen eine deutliche Rolle spielen. Es gab jedoch bisher auf nationaler Ebene, von dem Kundenforum des Geschäftsfeldes Luftfahrt des DWD abgesehen, keine Aktionsplattform aller am Flugverkehr Beteiligten, auch nicht von Forschungsgruppen, die sich des Themas *Wettereinfluß auf den Flugverkehr* annah-

men. Dies war die Ursache für die Gründung der Initiative *Luftverkehr & Wetter* durch DWD, DLR und Universität Hannover und die Motivation für die Erstellung dieses Statuspapiers.

Während die Umweltauswirkungen des Luftverkehrs (Schumann et al., 2001) in dem vergangenen Jahrzehnt national und international mit großem Erfolg untersucht wurden (siehe dazu z.B. IPCC, 2001) und auch in die Verkehrsplanung mit einbezogen werden, ist die komplementäre Fragestellung des Wettereinflusses auf den Luftverkehr national kaum und international nur von wenigen Staaten wie USA, Kanada, England und Frankreich untersucht worden.

Ein im Juni 2001 in Langen durchgeführter erster Workshop führte erstmals Vertreter aller am Luftverkehr beteiligten Gruppen zusammen. Als eine von mehreren Zielsetzungen (s.u.) wurde gefordert, den Dialog zwischen den am operationellen Betrieb beteiligten Entscheidungsträgern zu verbessern. Dies soll auch mit dem vorliegenden Statuspapier erzielt werden. Der zweite und besonders wichtige Schritt ist die Definition der übergeordneten inhaltlichen Zielsetzungen und die daraus resultierende prinzipielle Vorgehensweise:

Ziele und prinzipielle Vorgehensweise

- Identifikation und Quantifizierung des Wettereinflusses auf den Flugverkehr
- Entwicklung und Test von Methoden zur verbesserten Vorhersage der relevanten Wetterphänomene für die Luftfahrt, insbesondere im Kurzfristbereich
- Priorisierung der Aufgaben und Entwicklung spezieller, problemorientierter, kombinierter Vorhersage- und Beobachtungssysteme

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Integration der Vorhersage- und Beobachtungssysteme in Flugführungssysteme - Kosten-Nutzen Analyse zur Optimierung des Ressourceneinsatzes |
|---|

- Deutscher Wetterdienst
- Flughafen München GmbH
- Fraport AG
- Institut für Weltraumwissenschaften der FU Berlin
- Lido GmbH – Lufthansa Aeronautical Services
- Meteorologisches Institut der FU Berlin
- MeteoSolutions GmbH, Darmstadt
- Universität Hannover
- Vereinigung Cockpit e.V.
- Verkehrsfliegerschule Bremen

1.3. Ziele des Statuspapiers

Mit dem Statuspapier soll ein Dokument geschaffen werden, welches Grundlage für den angestrebten Dialog und Ausgangspunkt für weitere Maßnahmen und Aktivitäten sein soll. Informationsaustausch, Diskussion und Konsensbildung sind ein erster Schritt zur Beschleunigung solcher Maßnahmen. Das Statuspapier legt als erstes Dokument im Themenkomplex Luftverkehr und Wetter den derzeitigen Kenntnisstand dar. Alle Teilnehmer an den drei Fachgesprächen, die im Juni 2001 in Langen, im Dezember 2003 in Hannover und im Juni 2004 in Neuss stattfanden, hatten Gelegenheit zum Papier Stellung zu nehmen. Daher wird zwar kein Anspruch auf Vollständigkeit, wohl aber der Anspruch erhoben, daß dieser konsolidierte Statusbericht, der beim 3. Fachgespräch in Neuss verabschiedet wurde, auch von allen Beteiligten mitgetragen wird.

Die am Diskussionsprozeß beteiligten Organisationen sind:

- AMS-Gematronik – Weather Radar Systems
- Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen
- Deutsche Lufthansa AG
- DFS – Deutsche Flugsicherung GmbH
- DLR Institut für Flugführung Braunschweig
- DLR Institut für Physik der Atmosphäre Oberpfaffenhofen

2. Die Wetterfaktoren

Im Folgenden werden die einzelnen Wettereinflüsse auf den Flugverkehr dargestellt. Dabei geht es hier um eine Auflistung der Einflüsse und eine kurze Skizzierung ihrer Bedeutung, jedoch nicht um eine vollständige Wichtung hinsichtlich ihrer Bedeutung für Sicherheit und Effizienz. Letzteres ist Aufgabe zukünftiger Forschung.

2.1. Starkwind, Wind und Windscherung

Windrichtung und Stärke spielen bei Start und insbesondere bei der Landung eine wichtige Rolle. Grund dafür ist, daß Flugzeuge relativ zur bewegten Luft fliegen, aber auf einer festen Bahn mit vorgegebener Richtung starten und landen müssen. Beim Landevorgang erfordert dies ein Eindrehen unmittelbar vor der Landung in die jeweilige Landebahnrichtung. Dies ist nur möglich innerhalb bestimmter Seitenwindstärken und Windrichtungen. Werden diese Grenzwerte überschritten, so ist ein sicheres Landen in der Regel nicht möglich. Es drohen Abkommen von der Bahn und Aufschlagen der Flügel auf der Bahn.

Dreht der Wind im Laufe der Zeit, so muß u.U. die Anflugrichtung eines Flughafens geändert werden und damit auch die Staffelung der anfliegenden Flugzeuge. Landebahnwechsel verursachen daher automatisch verlängerte Anflugzeiten. Bedarf besteht hier für eine genaue Vorhersage von Windrichtung und auch -stärke, um den Wechsel besser vorbereiten zu können. Bei starkem Wind sind insbesondere während der Anflugstaffelungen die Flugkurven stark deformiert, so daß Piloten größere Abstände zum vorausfliegenden Flugzeug bevorzugen. Ist dann noch

zufälligerweise durch eine Wolkenschicht die Sicht reduziert und ein Sichtanflug nicht mehr möglich, so kann dies zu einer erheblichen Vergrößerung der mittleren Abstände und damit zu signifikanten Kapazitätsreduktionen führen. Ein solcher Fall trat im Oktober 2002 in Frankfurt auf, mit einem Einbruch der Kapazität auf unter 40%.

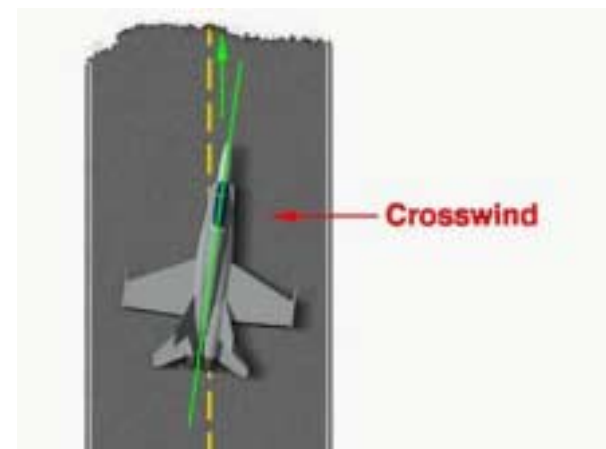


Abbildung 2.1: Typisches Problem bei zu starkem Querwind.

Windscherungen sind, wie im Zusammenhang mit Gewittern weiter ausgeführt, räumliche Änderungen (Gradienten) des dreidimensionalen Windvektors. Der Normalfall einer Windscherung in Bodennähe ist die Zunahme des mittleren Horizontalwindes mit der Höhe. Unterhalb von Inversionen findet man häufig Windscherungen, da durch die starke Stabilitätsänderung in der Inversion die Luftschichten in- und

unterhalb der Inversion entkoppelt werden. Ein Beispiel ist der Oberrand der atmosphärischen Grenzschicht. Windscherung kann Turbulenz erzeugen (siehe nächsten Abschnitt). Gefährliche Scherschichten mit Änderungen von 10 m/s auf 20 m Höhendifferenz finden sich beispielsweise in nächtlichen, bodennahen Strahlströmen (*low-level jets*) mit sporadisch auftretender Turbulenz. Scherung in der Höhenströmung äußert sich zumeist durch die damit korrelierte *clear air turbulence* (CAT). Scherung wird in der Grenzschicht besonders gefürchtet, da sie meist mit abrupten Höhenänderungen verbunden ist und damit das Risiko des Bodenkontaktes besteht. Strukturprobleme am Flugzeug treten hauptsächlich in Gewittern auf oder infolge der durch Scherung erzeugten Turbulenz. Extreme Turbulenz und Scherung und damit auch eine extreme mechanische Belastung des Flugzeuges treten in Tornados auf.

2.2. Turbulenz

Relevant für den Flugverkehr ist Turbulenz generell in der atmosphärischen Grenzschicht, unter konvektiven Bedingungen und im Bereich von Scherzonen, wie z.B. des Strahlstromes (Jet). Turbulenz kann durch Scherung erzeugt werden, aber auch durch Konvektion und Thermik. Man trifft daher bevorzugt Turbulenz in Bodennähe an, sowohl bei starkem Wind als auch bei starker Thermik.

Turbulenz in Bodennähe ist gefährlich, da Flugzeuge hier nach unten nicht mehr ausweichen können. Die Sicherheit des Fluges in Bodennähe hängt insbesondere von vertikalen Windgeschwindigkeitsschwankungen ab, die aber glücklicherweise mit Annäherung an den Boden abnehmen. Ansonsten sind horizontale Ge-

schwindigkeitsschwankungen gefährlich, weil sie den Auftrieb ändern und damit gerade bei langsam fliegenden Flugzeugen sicherheitsrelevante Sinkbewegungen hervorrufen können.

Unter konvektiven Bedingungen wird Turbulenz auch in Höhen bis zur Obergrenze der konvektiven Grenzschicht in etwa 2 km beobachtet, darüber hinaus auch in Wolken, speziell in und im Umfeld von Gewittern. Typisch für Gewitter sind die sehr starken Auf- und Abwinde und Änderungen auf kleinen räumlichen Skalen.



Abbildung 2.2: Illustration der Bereiche mit Turbulenz: (1) konvektiv, in Bodennähe, (2) CAT *en-route*, (3) über Bergen, (4) dynamisch verursacht in Bodennähe.

Mit *Clear Air Turbulence* (CAT) bezeichnet man Luftschichten mit starker Turbulenz außerhalb von Wolken (daher *clear air*) und außerhalb des Bodeneinflusses. CAT wird durch starke Scherung an Strahlströmen sowie durch brechende Wellen über Gebirgen und konvektiven Wettersystemen (Gewitter etc.) ausgelöst und ist vor allem wegen des unerwarteten Auftretens in einer ansonsten ruhigen wolkenfreien Atmosphäre meistens ein Komfort- und Sicherheitsproblem für die Passagiere. CAT kann jedoch auch zu einem Sicherheitsproblem für die Flugzeugstruktur anwach-

sen, z.B. in Kombination mit ungeeigneten Ruderbewegungen. Turbulenz führt auch zu häufigen Lastwechseln und damit Strukturbelastungen, was insgesamt zu Materialermüdung führen kann.

2.3. Flugzeugvereisung

Die Eisbildung am Rumpf, der Außenhaut, an Lufteinlässen, Krümmern, im Vergaser oder in der Klimaanlage des Flugzeuges kann das Flugverhalten, insbesondere den Auftrieb, aber auch die Funktionsfähigkeit einzelner Komponenten, z.B. des Triebwerks, erheblich beeinflussen. Flugzeugvereisung führt weltweit durch Unfälle zu annähernd 100 Todesfällen pro Jahr. Allein in Kanada traten in den Jahren 1980 bis 1990 insgesamt 937 Unfälle mit 585 Todesfällen auf (Guan et al, 2001).



Abbildung 2.3: Fingerförmiger Eisansatz am Flügelende einer DO-28 des DLR.

Bei der Eisbildung unterscheidet man (i) das Gefrieren unterkühlter flüssiger Wolkentröpfchen nach dem Auftreffen auf dem kalten Flugzeug, (ii) am unterkühlten Flugzeug gefrierender Regen, oder (iii) den Ansatz von festen Partikeln wie Schneeflocken oder Eiskristallen am Flugzeug. Seltener Fälle betreffen die Eisbildung bei adiabatischer Expansion feuchter Luft in Klimaanlage oder im Vergaser von Kolbenmotoren, die Reifbildung am stehenden Flugzeug, z.B. über Nacht oder

am Flugzeugrumpf beim raschen Verlassen kalter Luftschichten. Weiter kann es am Boden zu Eisbildung an Turbinenschaufeln in Folge unterschiedlicher Szenarien kommen. Man unterscheidet daher auch die Vereisung nach *in-flight icing* und *ground icing*.

Vereisung kann im Temperaturbereich 0°C bis -40°C auftreten. Das Gefrieren unterkühlter Tropfen am Flugzeugrumpf tritt beim Flug durch unterkühlte Wolken (*in-flight icing*) auf, wenn Wolkentröpfchen mit einem Durchmesser von ~20 µm oder Nieseltröpfchen (*drizzle drops*, mit einem Durchmesser von 50-500 µm) oder Regentropfen (> 500 µm) auftreffen und anschließend gefrieren. Man spricht im Falle der Nieseltröpfchen auch von SLD (*supercooled large drops*). Gefrierender Regen tritt auf, wenn Regentropfen in eine unterkühlte Luftschicht fallen und dort auf das Flugzeug auftreffen. Liegt die Luftschicht auf dem Boden auf, tritt am Boden Glatteis auf. Diese bekannte Form der Vereisung wird als klassischer Bildungsprozeß (*classical formation*) bezeichnet und ist leichter vorherzusagen als gefrierender Niesel.

Die besondere Gefahr, die von SLD oder gefrierendem Niesel ausgeht, liegt zum einen in den nicht bekannten atmosphärischen Bedingungen ihres Auftretens (deshalb *non-classical formation*), zum anderen darin, daß Flugzeuge nur bis Tropfen (genauer Tropfenkollektive) mit einem mittleren Durchmesser von 50 µm zugelassen sind (Appendix C; FAA, 1999). Flugzeuge entsprechen damit zwar den internationalen Zulassungsvorschriften, sind aber nicht unbedingt für alle Wolken geeignet. SLD stellen deshalb eine besondere Gefahr dar, weil sie nicht wie die normalen 20 µm großen Wolkentropfen im Staupunkt, z.B. an der Tragflächenvorderkante auftreffen und dort spontan gefrie-

ren, sondern aufgrund der freiwerdenden Gefrierwärme noch fließfähig bleiben und bis zu 1 m hinter der Flügelvorderkante stromab des Staupunktes fließen können, bevor sie dann schließlich gefrieren. Vereisung betrifft hauptsächlich Turboprop und kleinere Maschinen. Dies hat zwei Gründe. Kleinere Flugzeuge können nicht wie Jets nach oben aus Wolkenzonen herausfliegen und verbringen daher einen weitaus größeren Anteil an ihrer Flugzeit in Wolken. Zum anderen kann der Eisansatz nur pneumatisch entfernt werden. Dabei wird durch Ausdehnung einer Gummi-membran (*boots*) das angesetzte Eis ab-gesprengt. Dieses Verfahren benötigt we-niger Energie als thermische Verfahren, bei denen durch elektrisches Heizen oder heißes Abgas das Eis abgeschmolzen wird und das nur bei größeren Maschinen zum Einsatz kommen kann. Aber es ist kritischer, da die Enteisung nicht kontinu-ierlich, sondern nur nach einem bestimm-ten Eisansatz betrieben werden kann.

Eisansatz beeinflusst das Flugverhalten er-heblich und kann im ungünstigen Falle, wie etwa bei dem Absturz einer ATR-72 1994 bei Roselawn in der Nähe Chicagos, durch einen Eisgrat hinter den *boots* zum Strömungsabriß und damit zum Absturz führen. Dieser Absturz 1994 führte zu ei-ner internationalen, breit angelegten Akti-vität unter der Ägide der FAA, die Hinter-gründe und Ursachen der SLD zu erfors-chen und das Risiko zu minimieren. Der Prozeß, die Zulassungsvorschriften zu än-dern, ist jedoch noch nicht abgeschlossen.

Weitere Fragen gibt es hinsichtlich des Auftretens von Mischwolken mit flüssiger und fester Phase. Diese Wolken scheinen häufiger zu sein als bisher angenommen und sind insbesondere in konvektiven Si-tuationen gefunden worden. Konvektive Wolken einschließlich Gewitterwolken füh-

ren oft in ihrem oberen Teil zu starker Ver-eisung, auch wenn die Temperaturen knapp über -40°C sind und nach her-kömmlicher Erfahrung dann kein Risiko mehr vorliegen sollte, da man Vereisung üblicherweise nur bis -20°C beobachtet. Die vorherrschende Meinung, Mischwol-ken seien ungefährlich für die Vereisung, kann neueren wissenschaftlichen Erkennt-nissen nach nicht bestätigt werden.



Abbildung 2.4: Eisansatz an der Flügelvor-derkante einer DO-128 des DLR während ei-nes Meßfluges zur Untersuchung der Flug-zeugvereisung während der EURICE-Meßkampagne, nach erstmaliger Aktivierung der *boots*, Aufnahme von unten; im Bild unten die Triebwerksgondel. Foto: T. Hauf.

Neben der Verbesserung der internatio-nalen und diversen nationalen Zulas-sungsbedingungen wird auch eine Ver-besserung der meteorologischen Vorher-sage angestrebt, da abzusehen ist, daß Flugzeuge prinzipiell nicht für den Flug durch jegliche Vereisungssituation ausge-rüstet und zugelassen werden können. Solche neueren und komplexen Vorhersa-

geprogramme wie z.B. IIFA von NCAR/Boulder (McDonald, 2003) und ADWICE (Tafferner et al., 2003 und Leifeld, 2004) sind als experimentelle Produkte bereits verfügbar. Eine wesentliche Komponente dieser Produkte ist ihre Überprüfung durch unabhängige Meldungen der Piloten, den PIREPS. In Deutschland ist die Zahl der dokumentierten PIREPS um einen Faktor 100 kleiner als in den USA. Für die Verbesserung der Vorhersagemöglichkeiten werden daher Piloten aufgerufen, verstärkt Vereisungsmeldungen als PIREPS abzusetzen.

Weitere Verbesserungen betreffen eine umfassendere meteorologische Aus- und Weiterbildung der Piloten, die Entwicklung von *Exiting*-Verfahren aus Gefahrensituationen, die Konzeption vorausschauender *Remote-Sensing* Eisdetektoren an Bord, die Verbesserung von in-situ Eissensoren und die Kombination von an Bord gewonnenen mit externen Informationen zur aktuellen Vereisungssituation mit dem Ziel der Gefahrenerkennung und -vermeidung.

2.4. Sichtweite

Hinreichende Sicht ist für die Führung eines Flugzeuges elementar. Ohne zusätzliche unterstützende Instrumente ist ein Flug nur unter Sichtflugbedingungen möglich. Die atmosphärischen Bedingungen für Sichtflug sind genau festgelegt und zudem nur in bestimmten Lufträumen bzw. Höhenbereichen erlaubt. Instrumentenflug hingegen setzt entsprechende Instrumentierung und Zulassung des Flugzeuges und auch eine Qualifikation des Piloten voraus.

Ursachen reduzierter Sichtweite sind atmosphärische Aerosole, Wolken- und Niederschlagspartikel. Anzahldichte und Größe der einzelnen Partikel bestimmen die

optische Dicke als Integral über die Extinktion des Lichtes längs einer Wegstrecke. Die Erkennbarkeit von Objekten wird nicht nur durch die Sichtweite bestimmt, sondern hängt auch von den Beleuchtungsverhältnissen und der Blickrichtung ab.



Abbildung 2.5: Typische Sichtverhältnisse bei Dunst.

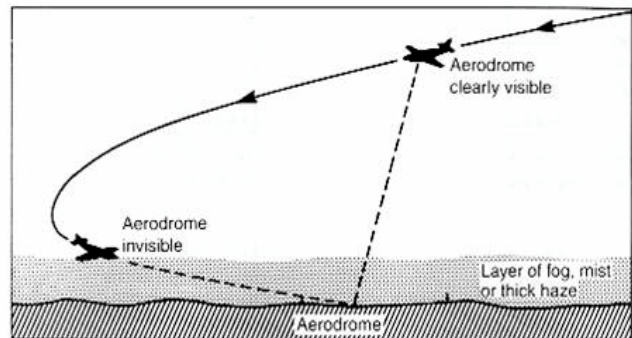


Abbildung 2.6: Reduzierte Sichtweite im Dunst bei horizontaler Blickrichtung.

Typische Sichtweiten betragen einige Meter in Gewitterwolken und bei Nebel, einige Kilometer in normalen Bedingungen in Bodennähe und Hunderte von Kilometern in klarer Luft. Problematisch ist beispielsweise bei einer bodennahen Dunstschicht, daß durch die Dunstschicht von oben ein Flughafen noch erkannt wird, daß aber beim Anflug aufgrund der erhöhten optischen Dicke in horizontaler Blickrichtung die Sichtweite dramatisch reduziert werden kann.

2.5. Niederschlag

Niederschlag in Form von Regen kann bei extrem hohen Wassergehalten zum Ausfall der Triebwerke (*flame-out*) führen (siehe z.B. Unfall 24 May 1988; TACA 737-300; nahe New Orleans, LA). Regen führt zu Fahrbahnässe und damit Schleudergefahr und verlängerten Bremswegen. Nichtdrehende Räder bei Aquaplaning können einen Flugzustand vortäuschen und z.B. das Einschalten der Schubumkehr verhindern. Neben der schon angesprochenen Gefahr von Schnee und Eis auf Tragflächen kann sich Schnee und auch Eis in Krümmern von Einlässen ablagern und dort zu Problemen führen. Während eines Amboßdurchfluges wurde schon von Triebwerkschäden durch eingezogenes Eis berichtet. Über Nacht, möglicherweise auch schon zuvor während der Abschalt- und Abkühlphase, kann sich an und in Triebwerken Eis ablagern, was eine Unwucht des Triebwerkes beim morgendlichen Wiederanlassen zur Folge haben kann. Abhilfe kann durch externes Heizen geschaffen werden.

2.6. Schnee und Eis

Winterliche Wetterverhältnisse auf Flughäfen sind häufig die Ursache von Verspätung oder potentiellen Gefahrensituationen, auf die mit speziellen Maßnahmen reagiert werden muß. Damit Flugzeuge problemlos starten und landen können, verfügen alle größeren Verkehrsflughäfen über ein komplexes System an Winterdienstprozeduren, die sich grundsätzlich in die zwei Bereiche "Flächenenteisung" und "Flugzeugenteisung" unterteilen lassen.

Unter Flächenenteisung versteht man den ganzen Komplex von Maschinen, Mitteln und Verfahren, mit dem Kontaminationen durch Schnee und Eis auf Flugbetriebsflä-

chen beseitigt werden. Neben mechanischen Räummethoden kommen hier auch sogenannte Bewegungsflächenenteiser zum Einsatz, die sich aufgrund der besonderen Anforderungen an den Luftverkehr deutlich von den im öffentlichen Straßenverkehr eingesetzten Mitteln unterscheiden.



Abbildung 2.7: Typische Wintersituation mit Enteisung.

Die Flugzeugenteisung als zweiter großer Sektor ist im heutigen Luftverkehrsbetrieb unerlässlich, da ein Flugbetrieb bei kontaminierten Flugzeugoberflächen aus Sicherheitsgründen nicht zulässig ist. Die hier erforderliche Enteisung von Flugzeugen durch Enteisungsflüssigkeiten ist eine technisch gut funktionierende Maßnahme, die allerdings bei hohem Verkehrsaufkommen zu Verspätungen führen kann. Gefahrenpunkte sind, daß die Enteisung u.U. nicht durchgeführt wird oder unvollständig ist (siehe Absturz Bremerhaven am 26.12.2001) und sich auch bis zum Start ein erneuter Schnee- und Eisbelag angesammelt haben kann (siehe Absturz Denver am 15.11.1987). Nach den Richtlinien von ISO, SAE und AEA sind in den letzten Jahren und Jahrzehnten Spezifikationen für Enteisungsmittel und Enteisungsprozeduren geschaffen worden, die die Basis für die Aufgaben an den jeweiligen Flughäfen bilden. Der Aufwand, der

für die Enteisung eines Flugzeuges betrieben werden muß, ist nicht zu unterschätzen. So werden in Abhängigkeit von der Größe des Luftfahrzeuges und dem Grad der Kontamination bis zu 6000 Liter Flüssigkeit versprüht, was je nach verwendetem Mittel in der Größenordnung von bis zu 15.000 € liegt.

Sicherheitsprobleme im Zusammenhang mit Schnee und Eis sind (i) die Bereitstellung sicherer Start- und Landebahnen sowie Verkehrsflächen, (ii) die Berechnung zutreffender Bremswege bei nassen Bahnen oder Bahnen mit Schnee oder Eis und (iii) die Sicherstellung, daß sich beim Start kein Eis oder Schnee auf dem Flugzeug befindet, etwa weil eine Enteisung nicht oder nur ungenügend durchgeführt wurde, oder weil nach erfolgter Enteisung neuerlicher Schneefall in Kombination mit langen Wartezeiten einen erneuten Schneebelag geschaffen hat. Effizienzprobleme treten auf durch eine Sperrung der Bahn während der Räumzeit, und durch die Startverzögerung bei notwendiger Enteisung, insbesondere wenn dadurch das vorgesehene Startfenster verloren geht. Hinzu kommen indirekte Effekte wie Verzögerungen in den Zubringerdiensten und mit Schneefall korrelierte Wettererscheinungen wie reduzierte Sichtweite.

2.7. Gewitter

Gewitter bergen für den Flugverkehr die größten Risiken, da in ihnen eine Reihe gefährlicher Wetterphänomene auftritt. Ihre Vermeidung führt automatisch zu signifikanten Beeinträchtigungen an Flughäfen und entlang der Luftverkehrsstraßen. Sasse und Hauf (2003) haben beispielsweise für den landenden Verkehr am Frankfurter Flughafen eine mittlere Beeinträchtigungsdauer von 3 Stunden für insgesamt 100

Flugzeuge und mit einer resultierenden Verspätungssumme von 1000 Minuten festgestellt.



Abbildung 2.8: Gewitter.

Dynamik und Strömungsverhältnisse.

Gewitter werden durch thermische Instabilität angetrieben, sie zählen daher zu den Konvektionsprozessen mit dominanten Vertikalströmungen. Für Gewitter ist eine vertikale Mächtigkeit des durchgehenden Hauptaufwindes von 10 km charakteristisch. In oder nahe diesem auch als Hauptaufwindeschlauch bezeichneten Vertikalwindfeld mit Stärken von bis zu +65 m/s treten nahezu alle signifikanten und relevanten Wettererscheinungen wie Hagel, Blitzschlag, Starkregen, Turbulenz, Fallwinde und Vereisung auf ¹.

Das eigentliche Hauptaufwindgebiet besitzt typische horizontale Abmessungen von einem Kilometer, während die Gewitterzelle 10 - 20 km breit ist. Wenn man den Amboß mit einbezieht hat ein Gewitter eine Längserstreckung von 50 - 100 km. Fliegt ein Flugzeug in eine Gewitterzelle ein, so können aufgrund der starken horizontalen Gradienten der Vertikalgeschwindigkeit von ~30 m/s / 100 m sehr

¹ Ursachenbezogene Unfallanalysen sind für den interessierten Leser z.B. unter: <http://aviation-safety.net/events> zu finden.

starke Kräfte auf das Flugzeug einwirken, die im Einzelfall die baulichen Grenzwerte der zulässigen Scherkräfte übersteigen können (siehe unten).

Mit dem Aufwind von der atmosphärischen Grenzschicht bis zur Tropopause gehen auch Abwinde einher, die typischerweise aus mittleren Höhen stammen und bis zum Boden durchreichen. Diese werden durch verdunstenden Niederschlag angetrieben. Ihre maximal beobachtete Stärke liegt bei etwa -25 m/s und ist daher betragsmäßig etwas schwächer als die der Aufwinde.

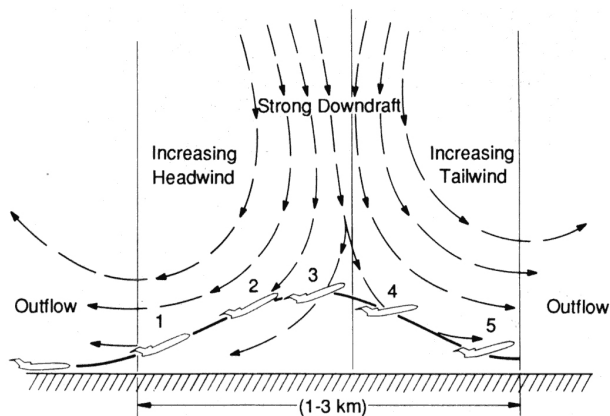


Abbildung 2.9: Räumliche Änderung des Windes (Scherung) in einem *Downburst* und die Wirkung auf ein Flugzeug (Elmore et al. 1986).

Die dynamische Struktur eines Gewitters ist gekennzeichnet durch konvergente Strömung unterhalb der Wolkenbasis, Aufsteigen im Hauptaufwind, und Abwinde (*downdrafts*, *downbursts*) bis zum Boden mit entsprechender Turbulenz. Die konvergente Strömung in Bodennähe in Kombination mit Abwinden wird oftmals als Scherung (*wind shear*) bezeichnet (siehe auch Kapitel 2.1) und ist für den startenden und landenden Flugverkehr ein signifikantes Problem. Horizontale Änderungen des Horizontalwindes können plötzlich den Auftrieb verringern und führen damit zu einem Absinken des Flugzeuges, das noch durch Fallwinde verstärkt werden kann

(Malcolm 1987), so daß ein in geringer Höhe fliegendes LFZ den Boden oder Hindernisse berühren kann, bevor vom Piloten eingeleitete Manöver greifen. Der Effekt tritt innerhalb weniger Sekunden auf und verlangt sofortige Reaktion.



Abbildung 2.10: „Nasser“ Downburst (der Intensität F1) in der Nähe von Oberpfaffenhofen am 9.7.2002. Die tiefe Wolkenbasis im Vordergrund markiert den Hauptaufwind, im Hintergrund sieht man das starke Niederschlagsgebiet des *Downbursts*, der mit seinen Böen schwere Waldschäden verursachte. Foto: R. Timm

Viele Abstürze in der Vergangenheit haben insbesondere in den USA zur Entwicklung von Windscherdetektionssystemen geführt. Diese bestehen im einfachsten Fall aus einer Reihe von um den Flughafen verteilten Anemometern, die divergente oder auch konvergente Strömungen detektieren sollen. Weiterentwicklungen nutzen Dopplerradarinformationen. Außerdem gibt es flugzeuginterne *windshear*-Warnanlagen, die auf der Reaktion des Flugzeuges basieren (ICAO WIST Manual; Lau, 2000, NRC, 1983; Wolfson et. al., 1994).

Gewitter bilden sich typischerweise bis zur Tropopause aus und stoßen mit ihrem überschießenden Aufwind gelegentlich auch einige Kilometer in die Stratosphäre vor, bevor die im Hauptaufwindgebiet aufgestiegene Luft wieder zurücksinkt. Dieser Vorgang ist dem Steinwurf in Wasser ver-

gleichbar und regt daher ebenfalls Schwerewellen an. Typischerweise breiten sich diese entlang der Tropopause aus, werden aber auch oberhalb von Gewittern angetroffen. Je nach atmosphärischen Umgebungsbedingungen können die durch Gewitter angeregten Schwerewellen auch brechen und dann zu CAT (*clear air turbulence*, siehe Kap. 2.2) beitragen. Steilen sich solche Schwerewellen vor dem Brechen auf, so entstehen abrupte Vertikalwindfelder, die ein zufälligerweise hereinfliegendes Flugzeug zu ebenso abrupten Höhenänderungen von einigen hundert Metern zwingen kann. Einige der nahe Gewittern beobachteten Vorfälle und auch Unfälle lassen sich damit erklären, wenn auch das Phänomen dieser sog. konvektiven Turbulenz noch nicht abschließend geklärt ist (Lane et al., 2003).

Blitze. Wesensmerkmale für Gewitter sind die elektrische Ladungstrennung, die Ausbildung von Raumladungswolken und die nachfolgenden Entladungen sowohl als Wolkenblitze als auch als deutlich stärkere aber weniger häufige Bodenblitze. Blitzraten von einigen zehntausend pro Gewitter sind durchaus auch in Deutschland möglich. Dazu muß man sich vergegenwärtigen, daß Gewitter eine typische Lebensdauer von einigen Stunden haben und in dieser Zeit einige Hundert Kilometer zurücklegen können. Flugzeuge können von Blitzen getroffen werden, aber diese auch auslösen. Aufgrund des zumeist metallenen Rumpfes und damit der Wirkung als Faradayscher Käfig dringen die elektrischen Felder nicht in das Flugzeuginnere ein. Bei zunehmender Verwendung von nichtmetallischen Werkstoffen müssen hier Vorsichtsmaßnahmen wie Einbau von metallischen Gittern ergriffen werden. Trotz des Faradayschen Käfigs verbleibt ein gewisses Restrisiko. Durch die anliegenden Spannungen können eventuell

Signalleitungen oder Rechner an Bord gestört werden und im Folgenden zum Ausfall von Bedieneinheiten führen.

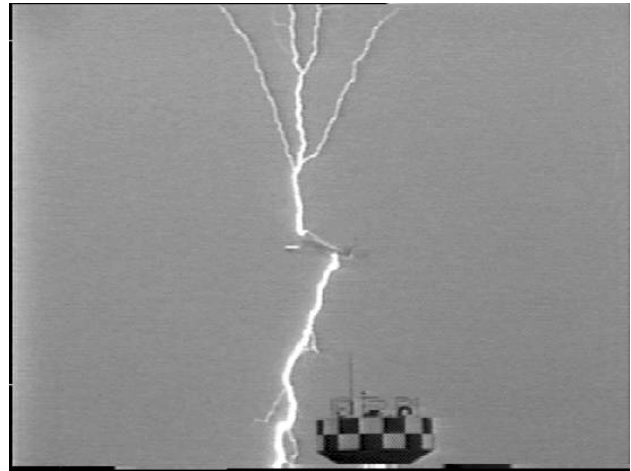


Abbildung 2.11: Blitzeinschlag in ein startendes Flugzeug.

Bei dem Absturz eines Flugzeuges bei Düsseldorf am 8.2.1988 wurde das Flugzeug zuvor vom Blitz getroffen. Blitze können das Flugzeug an einer Stelle treffen und an einer anderen Stelle wieder verlassen, es kann aber auch sein, daß sich das Flugzeug durch einen mehr oder minder ortsfesten Blitzkanal hindurchbewegt und dabei die Ein- und Auslaß-Stellen sich auf dem Rumpf von vorne nach hinten bewegen. An den Eintrittstellen kann es aufgrund der Hitzewirkung von ca. 5000-32000 K im Blitzkanal zu Hitzeschäden kommen. Im Mittel wird jedes Verkehrsflugzeug einmal pro Jahr getroffen. Weitere Beeinträchtigungen treten durch die Blendwirkung auf. Blitzschäden sind eine ernstzunehmende Gefahr für den Flugverkehr (Eichenberger, 1995; Reiber, 1998).

Vereisung. Die hohen Vertikalgeschwindigkeiten im Hauptaufwind führen zu einem raschen Transport von Flüssigwasser in große Höhen, durchaus bis zur Tropopause und gelegentlich auch darüber, mit entsprechend hoher Vereisungsgefahr. Man muß daher davon ausgehen, daß in

allen Höhenbereichen unterhalb der -40°C Grenze in Gewittern mit unterkühltem Wasser zu rechnen ist. Bei unbeabsichtigtem Eintauchen von oben in Gewitter einer Frontalzone wurde in zwei voneinander unabhängigen Fällen vom kompletten Zufrieren der beiden Pitotrohre berichtet – trotz eingeschalteter Heizung. Unterkühlte Tropfen bis 8 mm Durchmesser wurden während der EURICE Meßkampagnen (Amendola et al., 1998) in einer Gewitterwolke in Spanien mit einem Forschungsflugzeug dokumentiert (Sanchez et al., 1998).



Abbildung 2.12: Eisansatz an einer DO-28 der DLR nach Vereisungsmeßflug; Aufnahme am Boden nach der Landung.

Hagel und Starkregen. Die starken Vertikalbewegungen in Gewittern sind auch Ursache für Starkregen, Graupel und Hagel. Man muß dabei bedenken, daß nahezu jeder Regentropfen zuvor ein Graupel- oder Hagelkorn war, das erst beim Eintritt in die wärmeren unteren Luftschichten geschmolzen ist. Starkregen kann im ungünstigen Fall zum Erlöschen der Verbrennung in der Triebwerkskammer führen. Hagel wird bis über Faustgröße beobachtet mit einer größenabhängigen Fallgeschwindigkeit von bis zu 30 m/s. Nur gepanzerte Flugzeuge wie die Hurrikansforschungsflyer in den USA können Gewitter deswegen ohne Schaden durchfliegen.



Abbildung 2.13: Hagelschäden an einer B737 bei Genf am 15. August 2003.

Tornados. Tornados können im Zusammenhang mit intensiven Gewittern auftreten. Am 6. 10. 1981 kam es bei Moerdijk (Niederlande) zu einem Absturz einer Fokker F-28, die einem Gewitter auswich und in einen Tornado geriet, der zu Belastungen am Flugzeug zwischen dem $-3,2$ -fachen und $+6,8$ -fachen der Erdbeschleunigung führte, wodurch der rechte Flügel abriß (Roach & Findlater 1983¹). Die Instrumente an Bord (Radar) warnten die Crew zwar vor Starkniederschlägen im Gewitter, erkannten die dynamischen Strukturen (extreme Windscherungen und Turbulenz) des Tornados aber nicht.

¹ Siehe: <http://aviation-safety.net/database/1981> unter 06-OCT-1981

2.8. Vulkanasche und Sandstürme

Vulkanasche. Von den ca. 800 aktiven Vulkanen weltweit werden jährlich während 10 bis 20 Ausbrüchen Asche und Lava bis in Flugniveaus der Langstreckenflüge geschleudert. In den vergangenen 20 Jahren wurde von 80 Vorfällen beim Durchflug durch Aschewolken berichtet. Sieben von ihnen führten zu Triebwerksausfällen. Der spektakulärste Fall ereignete sich 1992 in Alaska, als bei einer B747 beim Durchflug durch die Wolke des Mt. Spurr alle Triebwerke versagten und es der Besatzung erst in 13000 ft gelang, diese wieder anzulassen und anschließend eine Notlandung durchzuführen.



Abbildung 2.14: Ausbruch des Mt. Spurr, Alaska, 1992.

Keiner der Vorfälle führte bisher zu Unfällen und Personenschäden, aber es entstand beträchtlicher Sachschaden von über 250 Millionen US-\$ seit 1982, Tendenz zunehmend. Die ICAO richtete in Folge der alarmierenden Ereignisse 1995 neun Vorhersagezentren für Vulkanasche VAAC (*Volcan Ash Advisory Centre*) weltweit ein. Diese Zentren versorgen Piloten während der Flugplanung und *en-route* mit Informationen zu Vulkanaschewolken als VAFTAD (*Volcanic Ash Forecast Transport and Dispersion Model*), NOTAM/ASHTAM (*Volcanic Ash NOTAM*), METAR, SIGMET, VAAS (*Volcanic Ash Advisory Sta-*

tement). Diese werden in enger Zusammenarbeit von Vulkanologen, Seismologen, Piloten, Fluglotsen und Meteorologen auf der Basis von vulkanologischen und seismologischen Messungen, Satellitenbeobachtungen (TOMS, geostationäre Satelliten), Pilotenreports (PIREP) und Trajektorienmodellen erzeugt.



Abbildung 2.15: Durch Vulkanasche beschädigtes Flugzeug.

Aschewolken sehen wie normale Wolken aus und können nicht mit herkömmlichem Bordradar entdeckt werden, da die Partikel zu klein dafür sind. Vulkanasche ist sehr abrasiv und kann dadurch substantiellen Schaden an allen exponierten Teilen des Flugzeuges und in den Triebwerken anrichten. Der Hauptschaden entsteht durch verglasende Asche in den Triebwerken, was zu Verstopfung der Düsen, reduziertem Luftdurchsatz und damit Leistungsverlust bis hin zum Erlöschen der Verbrennung im Triebwerk und Komplettausfall der Triebwerke führen kann.

Die gegenwärtigen internationalen Anstrengungen zielen 1. auf eine Verbesserung der Vorhersage- und Warnprodukte hin, insbesondere 2. den Einsatz neuer *Remote-sensing* Verfahren, 3. auf kürzere und aktuellere Warnzeiten und 4. verbessertes Pilotentraining.

Sandstürme. Sandstürme treten naturgemäß nur in Wüsten- und Steppenregionen auf, gelegentlich auch als aufgewirbelte Sandwolken im Sommer der mittleren Breiten. Je nach Stärke kann jeglicher Flugverkehr zum Erliegen kommen, da die Triebwerke versagen. Oder es wird im schwächsten Fall lediglich mit erhöhter Trübung zu rechnen sein. Sand kann aus Wüstenregionen bis in mehrere Kilometer Höhe aufgewirbelt und über Tausende Kilometer weit verfrachtet werden.



Abbildung 2.16: Sandsturm über Melbourne.

3. Auswirkungen der Luftfahrt

Zu den wetterbedingten Auswirkungen des Flugverkehrs auf Umwelt und den Verkehr selbst zählen die im Folgenden betrachteten Prozesse der Wirbelschleppenbildung, der Lärmerzeugung und Lärmausbreitung, der Bildung von Kondensstreifen und der Freisetzung von Schadstoffen. Auch wenn diese Prozesse vom Flugverkehr selbst erzeugt werden und damit im eigentlichen Sinne keine Wettererscheinungen sind, so sollen sie aus drei Gründen in diesem Statuspapier mit aufgenommen werden.

1. Das weitere Schicksal der von Flugzeugen erzeugten Wirbelschleppen, Lärm, Kondensstreifen und Emissionen hängt in wesentlichem Maße von atmosphärischen Bedingungen ab. Als solche sind zu nennen der Wind, die Turbulenz, die thermische Schichtung, die Vertikaltransporte in der Atmosphäre, der Niederschlag.
2. Es ist abzusehen, daß es künftig zu den meteorologischen Routineaufgaben gehören wird, diese Prozesse zu überwachen und vorherzusagen.
3. Die Prozesse werden teilweise jetzt schon in das ATM einbezogen. So gibt es schon in Shiphof, Zürich und in Paris Lärmkontingentierungen, in Frankfurt möglicherweise bald ein operationelles Wirbelschleppenwarnsystem, das dichtere Staffellungen bei den beiden eng benachbarten Parallelbahnen erlaubt. Einschränkungen der Routenwahl zur Minimierung der Umweltauswirkungen des Flugverkehrs sind in der Diskussion. Kondensstreifenbildung ist aus umwelt- und klimapolitischer Sicht, sowie aus militärischen Gründen von Interesse.

3.1. Wirbelschleppen

Die Wirbelschleppe, die ein Flugzeug hinter sich erzeugt, ist eine natürliche Folge des zum Fliegen notwendigen Auftriebs. Sie besteht aus zwei gegensinnig kreisenden Wirbeln etwa gleicher Stärke. Diese Wirbel bilden sich an den Flügelspitzen und an den Kanten der Landeklappen. Die potentielle Gefahr der Wirbel liegt primär in ihrem hohen Drehmoment, das die Sicherheit nachfolgender Flugzeuge, vor allem während Start oder Landung, beeinträchtigen kann.



Abbildung 3.1: Illustration der gegensinnig rotierenden Wirbel.

Daher sind genaue Abstandsregeln vorgeschrieben, die vor allem bei Start und Landung unter Instrumentenflugbedingungen (IMC) exakt einzuhalten sind. Diese Sicherheitsabstände bestimmen dann in ihrer summarischen Wirkung die Start- und Landefrequenzen auf großen Flughäfen und führen bei hohem Verkehrsaufkommen zu Kapazitätsengpässen und damit zu Warteschleifen und demzufolge zu unerwünschten Verspätungen (z.B. am Flughafen Frankfurt), die nicht zuletzt auch finanzielle Auswirkungen haben. Weil der internationale Luftverkehr stetig zunimmt, werden sich auch die durch Wirbelschleppen hervorgerufenen Kapazitätsengpässe verschärfen. Offen ist, inwiefern sich mit den Großraumflugzeugen des neuen

Typs, wie z.B. dem Airbus A 380, die Sicherheitsabstände und damit auch indirekt die Kapazitäten ändern.

Zunehmend kommt es auch beim Streckenflug in den Flugkorridoren zu Begegnungen mit Wirbelschleppen von Flugzeugen, die in der Höhe voraus fliegen oder entgegen kommen, nachdem aufgrund internationaler Absprachen der vertikale Abstand zwischen zwei Flugniveaus oberhalb FL 290 z.B. im nordatlantischen Flugkorridor von 2000 auf 1000 Fuß reduziert wurde.

Die durch die Wirbelschleppengefahr bedingten Sicherheitsabstände sind in den meisten Wettersituationen aus physikalischer Sicht unnötig groß, da die Ausbreitung der Wirbelschleppen derzeit nicht direkt überwacht wird und nur durch sehr konservative Vorschriften eine Gefährdung nachfolgender Flugzeuge ausgeschlossen werden kann. Wind und Turbulenzen sorgen oft für ein rasches Verdriften und einen schnellen Zerfall der Wirbelstrukturen. Man könnte also Verspätungen reduzieren und die Pünktlichkeit im Flugverkehr steigern, wenn es gelänge, die atmosphärischen Bedingungen und das dadurch bedingte Wirbelschleppenverhalten im Flugkorridor möglichst zeit- und ortsgenau vorherzusagen und zu beobachten.

Umgekehrt ist jedoch auch festzustellen, daß die heute praktizierte und erlaubte, aber möglicherweise meteorologisch nicht gerechtfertigte Reduzierung des Abstandes zwischen zwei Flugzeugen unter Sichtflugbedingungen auf dem Gleitpfad zu Begegnungen mit Wirbelschleppen führt, die dann auch als Zwischenfälle registriert werden, nicht immer jedoch Wirbelschleppen zugeordnet werden (siehe Abb. 1.2). Die Überwachung von Wirbelschleppen könnte auch dieses Sicherheits-

risiko minimieren. Informationen zur Wirbelschleppenforschung und verwandten Projekten finden sich im Kapitel 6.6 und bei Gerz et al. (2002).



Abbildung 3.2: Sequenz mit Wirbelschleppen beim Anflug auf den alten Flughafen von Hongkong.

3.2. Fluglärm

Fluglärm zählt zu den am häufigsten wahrgenommenen Umweltbeeinträchtigungen. Betroffen sind hiervon die Anwohner im Start- und Landebereich eines Flugplatzes, aber auch in den militärischen Tieffluggzonen. Das Thema Fluglärm ist komplex. Hier werden nur einige wenige allgemeine Aussagen aufgelistet:

1. Die gesundheitsbeeinträchtigende Wirkung von Fluglärm ist unstrittig, aber nicht abschließend erforscht.
2. Technische Maßnahmen am Flugzeug können die Lärmemission signifikant reduzieren.
3. Die Ausbreitung von Fluglärm ist auch wetterabhängig. Neben der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit hat Wind sowohl einen direkten Einfluss auf die Schallausbreitung in der Atmosphäre als auch einen indirekten Einfluss durch die angewandten An- und Abflugverfahren.
4. Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht hinsichtlich lärmoptimierter Anflugverfahren und -routen und Klappenkonfigurationen.
5. Der Schutz vor Fluglärm ist Ziel einer großen Anzahl von Bürgerbewegungen, insbesondere in der Nähe von Flughäfen. Diese repräsentieren eine politische Kraft, mit der sich die Politik und die Flughafenbetreiber bei Erhöhung des Luftverkehrsaufkommens, bei Restrukturierung des Luftraums, bei Umbau- und erst recht bei Ausbaumaßnahmen, aber auch schon bei Erhalt des Status quo auseinandersetzen müssen.
6. Es gibt Flughäfen mit Lärmkontingentierung. Fluglärm ist daher für diese Flughäfen schon ein kapazitätsbestimmender bzw. kapazitätslimitierender

der Faktor und kann dies auch für andere Flughäfen in der Zukunft werden.

7. Lärmzertifizierungen, fluglärmabhängige Gebühren und Nachtflugbeschränkungen sind weitere administrative Maßnahmen, die in Abhängigkeit der politischen und wirtschaftlichen Situation fluglärmwirksam angewandt werden.

3.3. Kondensstreifen

Es ist davon auszugehen, daß langfristig Kondensstreifen für die Routenplanung in Zukunft eine wachsende Bedeutung erfahren. Das Thema Kondensstreifen ist aus diesem Grund, wenn auch nur am Rande, ein Thema dieses Statuspapiers.



Abbildung 3.3: Kondensstreifen über dem Nordatlantik während der POLINAT-Kampagne (M. Brünner).

Kondensstreifen sind künstliche Wolken, die bei der Kondensation des bei der Verbrennung von wasserstoffhaltigen Treibstoffen wie Kerosin in den Triebwerken der Flugzeuge freigesetzten Wasserdampfes hinter den Flugzeugen entstehen.

Direkt am Ausgang der Triebwerke sind die Abgase sehr warm und daher ist hier die relative Feuchte sehr gering und der Wasserdampf in den Abgasen kann zunächst nicht kondensieren. Bei der Vermischung der Abgase mit der kalten Umgebungsluft wächst die relative Feuchte an und kann bei weitem die relative Feuchte in der Umgebung übersteigen. Wenn die Atmosphäre kalt genug ist, so daß die Feuchte in Abgasen im Verlaufe ihrer Mischung mit der Umgebungsluft die Sättigung bezüglich der flüssigen Phase erreicht, bilden sich kleine Tropfen auf den vorhandenen Kondensationskeimen. Die kleinen Tropfen gefrieren innerhalb von Bruchteilen von Sekunden und bilden Eispartikel. In sehr trockener Umgebung verdunsten die Eispartikel nach wenigen Sekunden. Bei höherer Feuchte in der Umgebung haben die Kondensstreifen eine größere Lebensdauer. Die Atmosphäre ist häufig eisübersättigt, d.h. die relative Feuchte bezüglich Eissättigung übersteigt 100%. Werte von 160% und mehr wurden mehrfach gemessen. In solchen Atmosphären „leben“ Kondensstreifen lange und können zu großräumigen Zirruswolken anwachsen. Zusätzliche oder veränderte Zirren können auch aufgrund der von den Flugzeugen emittierten Ruß- und Schwefelsäurepartikel gebildet werden, ohne daß vorher Kondensstreifen auftreten; dieser Wirkungspfad ist jedoch noch nicht vollständig erforscht.

Zirruswolken werfen einerseits Schatten und verringern daher die solare Einstrah-

lung am Boden. Zirruswolken verringern andererseits die thermische Ausstrahlung von der Atmosphäre in den Weltraum. Kondensstreifen und die zusätzlichen Zirren tragen daher einerseits zu einer Kühlung der Erde bei und führen andererseits zu einer generellen langsamen Erwärmung der Atmosphäre. Nach Stand des Wissens überwiegt im globalen Mittel und langfristig die Erwärmung. Daher sind aus Klimaschutzsicht Flugrouten möglichst so zu planen, daß Flüge in eisübersättigten Gebieten und in Zirren wenn möglich vermieden werden. Für das Militär ist schon die bloße Sichtbarkeit auch kurzer Kondensstreifen ein taktisches Problem. Gebiete in denen Kondensstreifen entstehen, lassen sich heute im Prinzip aus den Daten der Wetterdienste vorhersagen, allerdings können diese Methoden die Eisübersättigung und daher die Langlebigkeit von Kondensstreifen bisher nicht genau genug vorhersagen. Dies ist daher ein wichtiges Forschungsthema (Kärcher, 2000).

3.4. Gas- und partikelförmige Emissionen

Flugzeuge emittieren eine Reihe von Gasen und Partikeln, die die Zusammensetzung der Atmosphäre ändern und so die lokale Luftqualität im Umfeld von Flughäfen und das Klima der Erde beeinflussen. Der Stand des Wissens hierzu ist mehrfach in letzter Zeit dokumentiert worden (IPCC, 2001; Schumann et al. 2001). Forschungsbedarf besteht hier nach wie vor im Hinblick auf die regionalen Wirkungen und die globalen Klimawirkungen, insbesondere wenn die Emissionen mit wachsendem Flugverkehr wie zu erwarten stark zunehmen.

4. Wettereinfluß auf den Flugverkehr - Fakten

4.1. Erkenntnisse zum Wettereinfluß

Was wissen wir vom Wettereinfluß auf den Luftverkehr ? Generell muss festgestellt werden, dass es sich dabei um ein substantielles und nicht um ein marginales Problem handelt. Hier einige generelle Aussagen:

1. Wetter beeinflusst sowohl die Effizienz als auch die Sicherheit des Luftverkehrs. Dieser Einfluß wirkt mit unterschiedlichem Gewicht auf die beiden Kategorien ein. So ist Flugzeugvereisung (*in-flight icing*) beispielsweise hauptsächlich ein Sicherheitsproblem, jedoch weniger für Verspätungen verantwortlich. Die Tabelle veranschaulicht diesen Sachverhalt und trifft eine erste, heuristisch basierte Wichtung. Zum Thema Sicherheit siehe auch Abb. 1.2.

wetterbedingte Einflüsse:	Effizienz	Sicherheit
	stark -- schwach	stark -- schwach
• Sichtweite	●	●
• Vereisung	○	●
• Wind	●	○
• Gewitter	●	●
• Turbulenz	○	●
• Schnee & Eis	●	○
• Vulkanasche	○	●
• Sandstürme	○	●
• Sonderrolle: Wirbelschleppen	●	●

2. Wie weit diese Einflüsse reduziert werden können, ist nicht allgemein zu beantworten. Für jedes Wetterphänomen und für jeden Flughafen oder jede Region müssen spezifische Vorhersage- und Diagnoseprodukte entwickelt und diese in die Organisationsstrukturen der Luftverkehrssteuerung (ATM) implementiert werden. Bestehende

Untersuchungen lassen eine Reduktion der wetterbedingten Kosten im Bereich von 10 - 40% erwarten. Das Ereignis als solches und seine direkten Auswirkungen können nicht verhindert werden.

3. Der Wettereinfluß im Flughafennahbereich unterscheidet sich deutlich von dem in Luftverkehrsstraßen und -korridoren. Während Start und Landung ist daher mit anderen Wetterproblemen als während des Streckenfluges zu rechnen. Es gibt Wettereffekte, die bevorzugt während des Streckenfluges auftreten, wie z.B. CAT, und die nicht bei Start und Landung beobachtet werden. Andere Effekte wie Nebel oder Lärm sind nur in Bodennähe zu finden bzw. relevant, während Gewitter sowohl den Flughafennahbereich als auch die Luftverkehrsstraßen und -korridore beeinträchtigen können. Wirbelschleppen beeinträchtigen den Flugverkehr in der Flughafenumgebung, aber auch zunehmend in den Reiseflugkorridoren, in denen die vertikale Staffelung auf 1000 Fuß reduziert wurde. Die notwendige Zusammenführung des Verkehrs an den Flughäfen und auch in stark frequentierten Flugkorridoren macht diese besonders empfindlich für den Wettereinfluß, da vereinfacht gesagt, nur geringe Ausweichmöglichkeiten bestehen. Der Wettereinfluß ist daher im Flughafennahbereich und in den Luftverkehrskorridoren am größten.

4. Der Wettereinfluß zeigt eine große Variabilität von Flughafen zu Flughafen. Jeder Flughafen hat seine eigenen spezifischen Wetterprobleme, die sich aus der Kombination von Topographie mit Anordnung und Ausrichtung der

Landebahnen ergeben. In San Francisco ist der Nebel vom Pazifik ein lokales Problem, während für den neuen Flughafen in Hongkong starke Böen und Hangabwinde eine bekannte Gefahr bilden. Generell wird die Auswirkung von Hügeln (z.B. Stuttgart) oder Bergen (z.B. Innsbruck) auf die Sicherheit im An- und Abflug durch Wettereffekte verstärkt.



Abbildung 4.1: Regionaler, spezifischer Nebel in San Francisco.

5. Der Wettereinfluß variiert von Region zu Region aufgrund klimatischer Unterschiede. Im Voralpenland bilden sich mehr Gewitter als an der Nordseeküste, wo umgekehrt häufiger ein tief liegender Stratus den Flugverkehr beeinträchtigt.



Abbildung 4.2: Blizzard an der Ostküste – ein typisches nordamerikanisches Wetterphänomen.

6. Die Bedeutung des Wettereinflusses auf den Flugverkehr hängt von der Verkehrsdichte und der Bedeutung des Flugverkehrs in dem entsprechenden Land ab. Ist der Flugverkehr gering, so wird durch ein Wetterereignis zwar dieselbe spezifische Wirkung auf das einzelne Flugzeug ausgeübt, der kollektive Effekt auf den Verkehrsfluß („Stau“) tritt aber nicht auf. So weist der Flugverkehr seine größte Wetterempfindlichkeit dort auf, wo er am stärksten ist. Und dies ist, wie Abb. 4.3 zeigt, über den USA, Europa und im ostasiatischen Raum der Fall, hingegen weniger in Südamerika, Afrika und Australien.

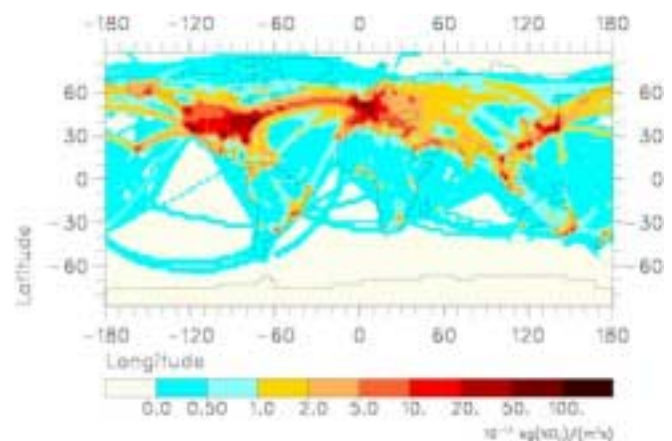


Abbildung 4.3: Globale NO_2 -Verteilung in $10^{-13} \text{ kg NO}_2 / \text{m}^2 \text{ s}$ aus dem Flugverkehr zur Illustration des der Dichte des globalen Luftverkehrs.

7. Der Wettereinfluß an einem Flughafen wird von Verkehrsaufkommen und Kapazitätsauslastung bestimmt. Neben dem Basiseffekt, daß mit zunehmendem Verkehrsaufkommen auch die Störanfälligkeit steigt, spielt insbesondere die Kapazitätsauslastung eine wesentliche Rolle. Hier das Verkehrsaufkommen für 2002 (nach ADV): Frankfurt (458.359), München (344.405), Düsseldorf (190.254). Operiert ein Flughafen nahe an seiner Ka-

pazitätsgrenze, festgelegt durch die jährlich bestimmten Kapazitätseckwerte, so werden sich dort Störungen und damit auch Wetterfaktoren, stärker bemerkbar machen, als wenn noch genügend freie Kapazität vorhanden ist. Demzufolge ist am Flughafen Frankfurt, der am oder sogar über den Kapazitätseckwerten operiert, eine stärkere Wetteranfälligkeit zu erwarten als z.B. in Hannover, selbst bei identischem Wettereinfluß auf das Einzelflugzeug.

8. Quantitative Untersuchungen zum Wettereinfluß auf den Flugverkehr bezüglich Effizienz oder Sicherheit, und zur Reduktion des Wettereinflusses beschränken sich im Allgemeinen auf Fallstudien einzelner Länder. Globale Untersuchungen sind selten. Hier einige Beispiele:

- White (1987): durch bessere Wettervorhersagen konnte der englische Wetterdienst europäischen Fluggesellschaften 50 Millionen £ p.a. einsparen.
- Robinson (1989): allein durch bessere Wettervorhersagen für den internationalen Atlanta Flughafen sparte eine Fluggesellschaft 1 Million US \$ p.a.
- Die europäische Flugverkehrskordinierungsstelle CODA von EUROCONTROL gibt für den Verspätungscode 71-79 („*weather*“) in Europa 2 bis 10% an.
- Evans (1995): Die Verspätungskosten in den USA belaufen sich auf 5 Milliarden US-\$ jährlich; davon entfallen auf schlechtes Wetter 65%, also etwa 3 Milliarden US \$ p.a.
- Sankey (2000): Wetter war an 23% aller US Unfällen beteiligt.

- DFS: Wetter trug im Dezember 2001 mit 79% zu allen ATM Verspätungen an den drei großen deutschen Flughäfen bei.
- Boeing Studie (aus *Aviation Week* vom 26.8.2002, siehe Abb. 1.2): Wetterfaktoren waren in 6% der tödlichen Unfälle die primäre Ursache; bei Zwischenfällen, die zum Verlust der Flugzeugkontrolle führten, war das Wetter zu etwa 70% beteiligt.

Die Beispiele des quantitativen Wettereinflusses zeigen eine große Streubreite. Dies ist typisch für die jetzige Situation: es gibt noch kein konsistentes und globales Bild der wetterbezogenen Kosten und Risiken. Die Hauptgründe wurden schon oben genannt:

- a) Methodische Unterschiede in der Definition der Maße, mit denen der Wettereinfluß bestimmt werden soll;
- b) Unterschiede in der Zuordnung der Ursachen, denn Unfälle und Vorfälle haben meistens mehrere Ursachen;
- c) die Information über die eigentliche Ursache geht oft verloren und wird nicht den Folgen zugeordnet. Beispiel ist die nichtaufgeholte Verspätung am Abend als Folge verspäteter Zubringerflüge am Morgen;
- d) generell haben Verspätungen die Tendenz zu einer nichtlinearen Verbreitung und sind von daher noch schwieriger zu erfassen.

Insgesamt ergibt sich so die sehr heterogene Wahrnehmung von Qualität und Quantität des Wettereinflusses auf den Flugverkehr. Trotz dieser Heterogenität belegen die Studien alle, daß Wetter einen signifikanten Einfluß auf die Sicherheit und Effizienz des Flugverkehrs ausübt. Bemerkenswert sind die immer wieder gefunde-

nen hohen Kosten der Verspätungen. Es ist also sinnvoll nach Lösungen und Verfahren zu suchen, den Wettereinfluß zu reduzieren, soweit es denn möglich ist. Die Erwartungen an die Meteorologie sind entsprechend groß.

4.2. Einzelstudien in Deutschland

Gewittereinfluß in Frankfurt.

In Deutschland wurden von der Universität Hannover in jüngster Zeit zwei Studien zum Wettereinfluß auf den Flugverkehr durchgeführt. Sasse und Hauf (2003) haben den Gewittereinfluß auf den landenden Verkehr am Flughafen Frankfurt untersucht und dabei gefunden, daß typischerweise ein Gewitter den Verkehr in der *Terminal Area Frankfurt* für etwa drei Stunden beeinträchtigt und bei ca. 100 betroffenen Flugzeugen eine Verspätungssumme von insgesamt 1000 Minuten hervorruft. Würden die damit verbundenen Kosten mit 100 €/min angenommen, so erhielte man einen Betrag von 100000 € pro Gewitter und bei 23 Gewittertagen (Annahme: ein Ereignis pro Gewittertag) im Jahr jährliche Kosten von 2.3 Mio. €.

Diese Zahlen sollen nur die Größenordnung der Kosten des Wettereinflusses demonstrieren. Zu berücksichtigen ist, daß der startende Verkehr nicht miteinbezogen wurde und nur die Positionsdaten der DFS benutzt wurden. Aus einer Analyse der Flugplanzeiten ergeben sich möglicherweise weitere Verspätungskosten. Die Untersuchungen belegen quantitativ, daß der Gewittereinfluß am Frankfurter Flughafen ein signifikanter Effekt ist. Damit wurde eine von vielen Betroffenen schon früher geäußerte Einschätzung bestätigt.

Tagespünktlichkeit und Wetter.

In einer Diplomarbeit (Spehr, 2003) und einem auf den Ergebnissen basierendem

Bericht (Spehr und Hauf, 2003) wurde der Wettereinfluß an den Flughäfen Frankfurt und München untersucht. Die Analysen stützen sich dabei auf die Tageswerte der Pünktlichkeit und die lokalen Wetterdaten an beiden Flughäfen über einen Zeitraum von zwei Jahren. Die Pünktlichkeit ist dabei als Anteil der Flüge mit mehr als 15 Minuten Verspätung an der Gesamtzahl der Flüge am Tag definiert. Mithilfe der multivariaten Regressionsanalyse wurden 28 Wetterparameter (Windgeschwindigkeit, Niederschlag etc.) für Frankfurt und 22 Wetterparameter für München bestimmt, die einen signifikanten Einfluß auf die Pünktlichkeitswerte ausüben. Mit dem so gewonnenen Parametersatz kann für jeden Tag die Pünktlichkeit geschätzt werden, die aufgrund der gemeldeten Wetterelemente zu erwarten ist. Bei der Anwendung des Modells auf die zweijährigen Datenreihen trat im Mittel eine Abweichung von 5 Prozentpunkten zwischen der real eingetretenen und der geschätzten Pünktlichkeiten auf, die nicht durch das lokale Wetter erklärt werden konnte. Nur 10% der Tage weisen eine Differenz größer als +11 bzw. -9,5 Prozentpunkten Pünktlichkeit auf. Der Anteil der vom Modell erklärten Streuung liegt bei ca. 50%.

Da die Entstehung für Verspätungen in Frankfurt oder München nicht unbedingt auch an diesen Orten begründet sein müssen, ist der hohe Erklärungsgrad des Modells zunächst überraschend. Dies ist in der Vernetzung des Flugverkehrs und durch die Korrelation des lokalen mit dem deutschland- oder sogar europaweiten Wetter begründet.

Flughafen Frankfurt – Projekte von Frankfurt.

Die maßgeblichen Faktoren zur Bewertung eines Flughafens sind Kapazität, Pünktlichkeit und Flugaufkommen. Alle drei sind

von einander abhängig, wodurch eine Optimierung des Gesamtsystems einen ganzheitlichen Ansatz erfordert. Aus diesem Grunde wurden bei der Fraport AG im Geschäftsfeld „Aviation“ 16 einzelne Projekte definiert, die sich mit Kapazitätsmanagement, Flugplanmanagement, Pünktlichkeitsmanagement und Prozeßmanagement befassen. Die Erkenntnisse der im Geschäftsfeld „Aviation“ abgeschlossenen Pilotprojekte wurden im Rahmen der Beteiligung am Luftfahrtforschungsprogrammes III in das Projekt K-ATM (Kooperatives Air Traffic Management) innerhalb des Geschäftsbereiches „Ausbauprogramm Flughafen – Luftfahrtforschung“ überführt und werden dort weiter vertieft. Es wird angestrebt, ab 2006 eine halbe Million Flugbewegungen auf 3 Bahnen zu ermöglichen.

Die derzeitige Situation am Flughafen Frankfurt ist gekennzeichnet durch Kapazitätsengpässe, bedingt v.a. durch das derzeitige Bahnsystem. Im Vergleich zu anderen Faktoren hat das Wetter den größten Einfluß auf die Pünktlichkeit im Luftverkehr.

Von RAND Europe wurde die Abhängigkeit der Pünktlichkeitsrate relativ zum Flugaufkommen nach den meteorologischen Parametern signifikante Wettererscheinung (inkl. Art und Intensität), Sichtweite und Windrichtung untersucht. Während die Windrichtung kaum einen Einfluß auf die Pünktlichkeitsrate hat, sinkt bei schwindender Sichtweite diese rasch. So tritt verbunden mit einem Sichtweitenrückgang von 8 km auf 4 km eine Reduktion um 5% ein, bei einem weiteren Rückgang auf 0 m Sichtweite eine Reduktion um 30%. Relativ zu einer Wettersituation ohne signifikante Wettermeldung findet man, jeweils gemittelt über das gesamte Flugaufkommen, folgende Reduktionen der

Pünktlichkeitsrate: Regen: -5%, Schnee: -20%, Eis: -24%. Des Weiteren sinkt bei lang anhaltendem Regen im Vergleich zu schauerartigem Regen die Pünktlichkeitsrate um 2%, bei Niederschlag mit Gewitter im Vergleich zu ohne Gewitter um 11%, bei gefrierendem im Vergleich zu nicht gefrierendem Regen um 23%. Die Intensitätsklassen der Wetterzustandsmeldung *leicht*, *mäßig* und *stark* haben Auswirkung auf den Pünktlichkeitsabfall gemäß *leicht* Faktor 0.7, *mäßig* Faktor 1 und *stark* Faktor 1.8.

Noch nicht untersucht wurde die Abhängigkeit der Pünktlichkeitsrate relativ zur zeitlichen Änderung der einzelnen Wetterparameter. Dies wäre jedoch unbedingt erforderlich, um eine umfassendere Einschätzung des Wettereinflusses zu erlangen. Zum Beispiel ist zu erwarten, daß die Pünktlichkeitsrate durchaus von Windrichtungswechseln beeinflusst wird, wohingegen, wie oben vermerkt, die Windrichtung selbst kaum einen Einfluß hat, aber bei Überschreitung einer festgelegten Rückenwindkomponente den Wechsel der An- und Abflugverfahren erzwingt.

Der Wettereinfluß wird bei Fraport in verschiedenen Projekten berücksichtigt, die zur Regelung des Flugaufkommens initiiert wurden. Im Projekt CAPCO (*Capacity, Performance, Control*) sollen aktuelle Verkehrszahlen für Flugbewegungen, Pünktlichkeit und Kapazität aufgezeichnet und 12-stündige Prognosen für diese Parameter bestimmt werden. Dieses System benötigt neben aktuellen auch die entsprechend prognostizierten Wetterdaten.

Eng damit verbunden ist das Projekt RACOP (*Reduced Airport Capacity Operations*), in dem Betriebsverfahren entwickelt werden zur Bestimmung der zu verzögernden, zu beschleunigenden, umzulei-

tenden oder zu annullierenden Flüge. Es besteht also der Bedarf an genauen Wetterprognosen für die oben angegebenen Parameter.

In einem ersten Schritt müssen die vorhandenen Wetterinformationen und Vorhersageprodukte des DWD in die Betriebsverfahren einbezogen werden. In einem zweiten Schritt sind die Vorhersagen der relevanten Parameter im erforderlichen *Scale* und für einen typischen Prognosezeitraum von 12 Stunden zu verbessern. Man hat auch begonnen, Prognosefunktionen zu definieren, welche die Pünktlichkeitsrate in Abhängigkeit von der Anzahl der Flugbewegungen, des Flugzeugmix und des Wetters bestimmen, letzteres aufgeteilt nach Wind, Sicht, Wettererscheinung und Intensität.

4.3. Österreichische Studie für Wien

Im Rahmen einer Diplomarbeit (Peer, 2004) zum Thema wetterbedingte Verspätungen am Flughafen Wien am Institut für Meteorologie und Geophysik der Uni Innsbruck wurden Wettermeldungen im METAR-Code der Flugsicherungsstelle Wien der AustroControl mit Verspätungsdaten der Austrian Airlines Group im Jahr 2002 verglichen. Dabei wurden die internen Verspätungs-Codes für wetterbedingte Verspätungen für das gesamte Jahr analysiert und mit den Wettererbedingungen verglichen. Es wurden folgende Zusammenhänge gefunden:

(1) Sicht und Wolkenuntergrenzen waren im Winter in erster Linie für kürzere Verspätungen bei den Abflügen verantwortlich. Es wurden nur wenige Fälle von längeren Verspätungen über 5 min registriert. Dazu ist zu sagen, daß Wien kapazitätsmäßig nur zu we-

nigen Zeiten so stark ausgelastet ist, daß ein Übergang auf *low visibility conditions* gleich einen starken Stau bei den ankommenden Flügen erzeugen würde, wie das bei sehr stark frequentierten Drehkreuzen (Frankfurt, Heathrow etc) oder bei Plätzen mit eingeschränkten Instrumentenanflügen auf einzelnen Pisten (wie etwa Zürich) der Fall wäre.

- (2) Im Winter wurden starke Häufungen von Verspätungen fast durchwegs bei Schneefall und Wetterlagen beobachtet, wo eine Flugzeug-Enteisung am Boden notwendig wurde. Einige wenige Tage verursachten hier die überwiegende Mehrheit der gesamten Verspätungsminuten.
- (3) Im Sommer erwiesen sich konvektive Ereignisse als besonders verspätungsintensiv. Eine Ursache dafür ist die Vorschrift, daß bei Gewittern am Platz viele Tätigkeiten, z.B. Betankung, aber auch andere Arbeiten vorübergehend eingestellt werden, was zu größeren Verspätungen führt.
- (4) Eine Nachuntersuchung der Verhältnisse im Jahr 2003 lieferte sehr ähnliche Ergebnisse. Unterschiede gab es nur bzgl. des zeitlichen Auftretens der Ereignisse; im Sommer, da die Gewitteraktivität im heißen und recht trockenen Sommer 2003 auf andere Monate verteilt war als im Jahr 2002, und im Winter, weil der Schwerpunkt der Niederschläge zu anderen Zeiten erfolgte. Die Verteilung auf die Phänomene war aber nahezu identisch.

5. Situation in Deutschland

5.1. Gesetzliche Grundlagen

Die Steuerung des zivilen Luftverkehrs in Deutschland erfolgt durch die Deutsche Flugsicherung und für den oberen Luftraum durch EUROCONTROL. Für die Flugmeteorologie in Deutschland ist der Deutsche Wetterdienst zuständig. Die wichtigsten Grundlagen für die Aktivitäten des Geschäftsfeldes Luftfahrt des DWD sind das Gesetz über den Deutschen Wetterdienst (DWD-Gesetz), das Luftverkehrsgesetz (LuftVG), sowie die Richtlinien der ICAO, der WMO und von EUROCONTROL. Gemäß DWD-Gesetz §4 ist "die meteorologische Sicherung der Luft- und Seefahrt" Aufgabe des Deutschen Wetterdienstes. Paragraph 27e des Luftverkehrs-Gesetzes regelt die Zuständigkeiten und Aufgaben wie folgt:

„Der Flugwetterdienst dient der meteorologischen Sicherung des Luftverkehrs. Die Erfüllung dieser Aufgabe obliegt dem Deutschen Wetterdienst oder anderen damit ausdrücklich beauftragten Stellen. Der Flugwetterdienst umfaßt insbesondere folgende Aufgaben:

- (1) *die Flugwetterberatungs- und -betriebsdienste, zu denen gehören*
 - (a) *die Wetterüberwachung*
 - (b) *die Erstellung standardisierter Vorhersagen nach internationalen und nationalen Vorgaben,*
 - (c) *die Flugwetterberatung,*
 - (d) *die Erstellung und Verbreitung von Warnungen vor Wettererscheinungen mit Auswirkungen auf den An- und Abflug - sowie den Rollverkehr und vor fluggefährdenden Wetterereignissen auf der Strecke,*

(e) *die Ausgabe standardisierter Flugwetterberatungsunterlagen in alphanumerischer und grafischer Form;*

- (2) *die erforderlichen technischen Einrichtungen und Dienste, zu denen gehören*
 - (a) *die Beschaffung, der Einbau und die Abnahme der meteorologischen Meßanlagen und Datenerfassungs- und Datenverbreitungsanlagen sowie der fachtechnischen Systeme,*
 - (b) *der Betrieb, die Instandhaltung und die Überwachung der meteorologischen Meßanlagen und Übertragungssysteme, die Entwicklung und Pflege der Anwendungsprogramme in der elektronischen Datenverarbeitung für den Flugwetterdienst;*

(3) *die Planung und Erprobung von Verfahren und Einrichtungen für den Flugwetterdienst;*

(4) *die Sammlung und die Bereitstellung von flugklimatologischen Daten und Statistiken.“*

Der DWD ist als *National Meteorological Authority* in die weltweite Sicherung der Luftfahrt entsprechend dem ICAO-Abkommen eingebunden. Konkret umfassen die dem Wetterdienst per Gesetz zugewiesenen Aufgaben:

- Flugwetterwarndienst, Flugwetterüberwachungsdienst, Flugwetterberatungsdienst
- Beobachtungsdienst, Dokumentationsausgabe- und INFOMET-Dienst im Geschäftsbereich Technische Infrastruktur
- die Produktion von *Low Level Significant Weather Charts* und Flugwetterübersichten im Geschäftsbereich Basisdienste.

Im Rahmen von internationalen Arbeitsteilungen erfolgt die Versorgung der zivilen Luftfahrt für den oberen Luftraum im Rahmen des *World Area Forecast System* (WAFS) mit Zentren in Exeter (England) beim *UK Meteorological Office* und in Washington (USA).

Die dargelegten gesetzlichen Regelungen spiegeln die naturgemäße Aufgabe des Gesetzgebers wider, Sicherheit zu gewährleisten. Wie ein Blick auf das LuftVG §27c, der Grundlage der Flugsicherung in Deutschland, zeigt, ist eine Verpflichtung, den Luftverkehr effizient und verspätungsminimiert zu betreiben, auf den ersten Blick hin nicht erkennbar. Dies scheint den Flughafenbetreibern und Fluggesellschaften überlassen zu sein. Angesichts zukünftiger wachsender wetterbedingter Unkosten mag die gesetzgeberische Verantwortung auch hier stärker erforderlich sein.

5.2. Produkte und Leistungen des Deutschen Wetterdienstes für die Luftfahrt

Die Leistungen des DWD. Die Leistungen des DWD umfassen das gesamte Spektrum, wie es von der ICAO vorgegeben ist. Zu den Leistungen gehören vor allem:

- Beobachtungen und Messungen an den internationalen Verkehrsflughäfen und Betrieb eines Radarverbundnetzes;
- Erstellung von Vorhersagen in codierter Form für die Flughäfen sowie für die FIRs;
- Herausgabe von Warnungen;
- Spezialdienstleistungen für die DFS, Fluggesellschaften, Flughafenbetreiber und anderen im Luftfahrtbereich tätige Firmen;

- meteorologische Fachaufsicht über die Regionalf Flughäfen;
- Ausbildung von Wetterbeobachtern an den Regionalf Flughäfen;
- Basisprüfungen von industriell gefertigten Meß- und Beobachtungssystemen.

Die wichtigsten Produkte.

- Beobachtung und Messung der relevanten meteorologischen Parameter an den Flughäfen mit den entsprechenden Meßsystemen (Anemometer, Transmissiometer, Ceilometer, Thermometer usw.) im Halbstundentakt in Verbindung mit Kurzzeitvorhersagen (METAR und TREND).
- Bei bestimmten, von der ICAO definierten Ereignissen zusätzlich Herausgabe von Sonderwettermeldungen (SPECI).
- Wettervorhersagen für die Flughäfen in codierter Form für die Vorhersagezeiträume +9 Stunden und +18 Stunden (TAF und Lang-TAF).
- Vorhersagen für die DFS für die verschiedenen FIRs in Textform ergänzt durch Daten.
- Spezielle Vorhersagen und Warnungen in codierter Form SIGMET, AIRMET, ab dem 1. 4. 2003 auch GAMET. Inhalte sind alle flugrelevanten Parameter wie: Wind, Turbulenz, Vereisung, Gewitter, *Squall-lines*.
- Herausgabe von *Low Level Significant Weather Charts* für Mitteleuropa für den Höhenbereich SFC bis FL 245.
- Diverse Spezialprodukte für Fluggesellschaften und Flugsicherung wie Daten der numerischen Vorhersagemodelle von FL 50 bis FL 650 (in 50er Schritten) mit 28 km Auflösung für Mitteleuropa, spezielle Vorhersagen für die Winterdienste der Flughäfen auf Basis eines an die NWV gekoppelten

Strahlungsbilanzmodells, speziell aufbereitete Satelliten- und Radarbilder.

Planungen und Entwicklungen. In der Entwicklung sind im Rahmen internationaler Zusammenarbeit Verfahren und Systeme zur vollständigen Automation der Messungen und Beobachtungen an den Verkehrsflughäfen (AUTOMETAR) unter Verwendung von modernen *Present Weather* Sensoren und geeigneten Algorithmen. Für die interessierten Flughafengesellschaften, die Fluggesellschaften und für die örtlichen Flugsicherungsdienste werden durch Internet- und Telefonverbindungen routinemäßige oder situative Schichtbriefings angeboten mit besonderen Hinweisen auf die Wetterentwicklung in der TMA oder direkt am Flughafen. Hierfür kommen in Absprache mit den Kunden auch spezielle Grafikprodukte zum Einsatz.

Im Rahmen von internationalen Projekten wird, gefördert durch die EU, an der Verbesserung der Vorhersage von *Low ceiling* und *Low visibility* Bedingungen gearbeitet.

In Zusammenarbeit mit DLR-IPA und IMUK Hannover wird beim DWD am Verfahren ADWICE zur Diagnose und Vorhersage von vereisungsgefährdeten Lufträumen (Flugzeugvereisung) gearbeitet. Im Frühjahr 2004 wurde eine neue Version von ADWICE, die auf einer an der Universität Hannover durchgeführten Promotion aufbaut, zum Test in den Routinebetrieb beim DWD genommen. Die nächsten Schritte zur Weiterentwicklung (z.B. Verbesserung der Berechnung und Ausgabe von Vereisungsgraden) wurden bereits eingeleitet.

Im Rahmen der Verbesserungen der NWV-Produkte wird an neuen Methoden zur Turbulenzvorhersage auf Basis der mit

dem operationellen nichthydrostatischen Vorhersagemodell LM bereits jetzt routinemäßig berechneten turbulenten kinetischen Energie (TKE) gearbeitet. Mit einer hochauflösenden Version dieses Modells (LMK, Lokal Modell Kurzestfrist) sollen zukünftig alle drei Stunden neue Vorhersagen für einen Zeitraum von 18 Stunden gerechnet werden. Damit soll es mittelfristig möglich sein, die relevanten Wetterphänomene in einer TMA mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung vorherzusagen. Die Postprocessingverfahren, bei denen häufig eine statistische Weiterverarbeitung von aktuellen Meßdaten, "klimatologischen" Daten und aktuellen NWV-Ergebnissen zur Anwendung kommt, werden kontinuierlich weiterentwickelt. Stichworte sind TAF *Guidance* mit Wahrscheinlichkeitsangaben zur Entwicklung aller flugrelevanten Wetterparameter (Sichtweite, Wolkenuntergrenze, Schauer, Gewitter, Wind, usw.) oder AUTOTAF mit vollautomatischer Enkodierung.

5.3. Weitere Aktivitäten

Das **Institut für Physik der Atmosphäre** (IPA) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen führt im Schwerpunkt „Luftfahrt“ des DLR (Programm *Luftverkehr und Umwelt*) folgende Vorhaben und Projekte durch:

- Partikel, Kondensstreifen und Zirren (HGF-Projekt PAZI 1 und 2);
- Wirbelschleppe (DLR-Projekte 1 und 2 und EU-Projekte C-Wake, S-Wake, I-Wake, ATC-Wake, MFLAME, WAVENC, AWIATOR, FAR-Wake WakeNet und WakeNet2-Europe), insbesondere Aufbau eines Systems zur Vorhersage und Beobachtung von Wirbelschleppen (WSVBS) und seine Demonstration am Flughafen Frankfurt;

- Lärm im Umfeld von Flughäfen (HGF-Verbundprojekt *Leiser Flugverkehr* und EU-Projekte, u.a. SOBER);
- Aufbau von Wetterexpertensystemen (*weather products*) für Piloten (im EU-Projekt FLYSAFE, siehe 6.3) und für das Flugverkehrsmanagement; insbesondere Verbesserung von numerischen Wettervorhersagemodellen durch Entwicklung von probabilistischen *Nowcasting*-Verfahren und Ensemble-Vorhersagen und zur Prognose von Starkniederschlägen;
- Emissionen und ihren Wirkungen auf das Klima (mit EU-Projekten wie AERONOX, POLINAT 1 und 2, AERCONTRAIL, EULINOX, CLOUDMAP, INCA, METRIC, CRYOPLANE, TRADEOFF, SCENIC etc.)

Im Rahmen einer Studie für das BMVBW hat das IPA des DLR untersucht, wie die Versorgung mit Wetterinformationen am Flughafen Frankfurt durch den Aufbau eines integrierten Flugwetter System Frankfurt (IFWS-F) verbessert werden kann. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dieses IFWS-F in Anlehnung an das amerikanische ITWS aufzubauen, jedoch unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten und der vorhandenen Meßsysteme. Als die Wetterphänomene, die den Luftverkehr in Frankfurt am meisten beeinträchtigen und bei denen mit einer entsprechenden Vorhersage eine Reduzierung wetterbedingter Verspätungen erwartet wird, wurden Niederschlag (Gewitter, Schneefall) und der Horizontalwind identifiziert. Es ist nicht nur der aktuelle Zustand von Interesse, ebenso werden für die Planung des Flugbetriebs je nach Nutzer Vorhersagen für die Zeiträume

- bis 30 Minuten,
- bis 3 Stunden und
- bis zu einem Tag

benötigt. Durch eine Kombination von einer Vielzahl von Beobachtungssensoren (Wetterradar, Windprofiler, Lidar, Bodenmessungen, Flugzeugmessungen [AMDAR], Satelliten, Blitzsensoren) und kurzfristiger Wettervorhersage können für diese Zeiträume Vorhersagen erstellt werden.

Als wichtigstes Instrument zur Überwachung von Gewittern und des Windes wird ein schnell abtastendes Doppler-Wetterradar erachtet, das speziell für den Flughafen Frankfurt zeitlich und räumlich hochaufgelöste Messungen des Niederschlages und des Winds erstellt. In Kombination mit dem in den DWD Radarverbund integrierten Doppler-Wetterradar in Frankfurt kann der Horizontalwind im gesamten Anflugbereich erfaßt werden. In Ergänzung zu dem Radar ist es sinnvoll, im Flugplatznahbereich und Endanflugbereich die Windmessungen mit einem Doppler-Lidar zu ergänzen. Dieses Gerät kann besonders auch zur Lokalisierung von Wirbelschleppen und Turbulenzen (z.B. im Lee von Waldkanten) verwendet werden. Durch die Kombination dieser beiden Geräte mit Flugzeugbeobachtungen, vorhandenem Windprofiler der DFS, und Bodenbeobachtungen kann ein umfassendes Bild der Atmosphäre bezüglich Niederschlag und Wind erstellt werden und für die Vorhersage genutzt werden.

Viele beim ITWS verwendeten Analyse- und Vorhersageprodukte oder Sensoren sind bereits in ähnlicher Form in Frankfurt vorhanden, eine Ergänzung mit ITWS Produkten und eine Überarbeitung ist jedoch notwendig und kann vom DWD in Zusammenarbeit mit anderen Partnern durchgeführt werden. Als besonders wichtig für die Akzeptanz eines solchen Systems durch die Nutzer (Flugsicherung, Fluggesellschaften, Piloten, Flughafenbetreiber) ist eine nutzerorientierte Aufbe-

reitung der Daten und Darstellung als Grafik oder Textnachricht. Nur so wird es möglich sein, Nutzen aus einem solchen System zu ziehen und die Zahl wetterbedingter Verspätungen bei gleich bleibender Sicherheit zu reduzieren.

Darüber hinaus führt das Institut für Physik der Atmosphäre des DLR mittelfristige fachliche Forschungsprogramme durch zu Wolkenphysik, Turbulenz in der Atmosphäre (incl. Grenzschichtturbulenz, Gebirgsüberströmungen und CAT), Vereisung, Blitzdetektion im Umfeld von Gewittern. Es entwickelt und betreibt Radar- und Lidar-Systeme, Flugmeßsysteme, mesoskalige und globale Modelle.

Ein weiteres Programm im DLR Luftfahrt-Schwerpunkt befaßt sich mit dem Thema „Leiser und sicherer Flugverkehr“. Das **DLR-Institut für Flugführung** (FL) in Braunschweig verfolgt dabei u.a. folgende Ziele:

- Identifizierung von Kriterien und Entwicklung neuer Methoden zur Bewertung der Ressourcenauslastung der luftseitigen Flughafen-Infrastruktur sowie deren Anwendung auf reale Flughafendaten;
- Erstellung eines „Effizienzmeßsystems“ für Flughäfen auf der Basis aktueller Verkehrsdaten (Radarflugspuren, Flugpläne, Verspätungen, Wetterbedingungen u.a.);
- Entwicklung eines Schnellzeitsimulationsmodells für Flughäfen zur Simulation aller Prozesse im Zusammenhang mit der Bewegung eines Luftfahrzeuges bis zum *Gate* zur Ermittlung von Verkehrskenngrößen (Verspätung, Kapazität). (Projekt FATIMA: in Vorbereitung);
- Entwicklung kombinierter *Arrival* und *Departure* Management Systeme mit integrierten Wirbelschleppenwarnsys-

temen, *Free-Flight* Funktionalitäten und automatisierter Arbeitsteilung zwischen Bord- und Bodensystemen;

- Entwicklung eines Verkehrsmanagementsystems für Flughäfen durch die Vernetzung von Anflug-, Abflug- und Rollverkehrsmanagement untereinander sowie mit den Systemen des Flughafens, der Fluggesellschaften, des Wetterdienstes und mit den einzelnen Verkehrsteilnehmern;
- Entwicklung neuartiger verkehrsträgerübergreifender Leitsysteme unter Berücksichtigung der verschiedenen Nutzer/Betreiber an Flughäfen und Evaluierung dieser Systeme an der Leitstandssimulation.

Das **Institut für Meteorologie und Klimatologie** der **Universität Hannover** führt eine Reihe von Grundlagenstudien zum Wettereinfluß auf den Flugverkehr durch. Neben den schon erwähnten Studien von Sasse und Hauf (2003) und Spehr und Hauf (2003) wird der Winterwettereinfluß untersucht und an der Verbesserung der Vereisungsvorhersage (ADWICE) gearbeitet. Das Institut beteiligt sich ebenso wie das DLR an dem beantragten Projekt FLYSAFE (siehe Kapitel 6.3).

6. Europäisches und internationales Umfeld: Tendenzen und Programme

Die hier angeführten Informationen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern sind mehr als Hinweise zu verstehen.

6.1. ICAO

Die *Meteorology Section* der *International Civil Aviation Organization (ICAO)* ist im Rahmen ihres technischen Arbeitsprogramms zuständig für:

- luftverkehrstechnische Anforderungen an meteorologische Dienstleistungen für den internationalen Flugverkehr; so u.a. für: das *World Area Forecast System (WAFS)*, die Zuständigkeiten und Pflichten der Wetterdienste, Umfang und Standard von meteorologischen Beobachtungen, Herausgabe von Warnungen, meteorologische Serviceleistungen für diverse Nutzer (Piloten, Rettungsdienste, etc), die Kommunikation meteorologischer Informationen;
- die meteorologische Komponente des zukünftigen Kommunikations-, Navigations-, Überwachungs- und *Air Traffic Management Systems CNS/ATM*;
- spezielle Warnprogramme und Warnprodukte wie Vulkanüberwachung.

Dazu werden mehrere Arbeitsgruppen unterstützt und organisiert:

- *Meteorological Information Data Link Study Group (METLINKSG)*;
- *Volcanic Ash Warnings Study Group (VAWSG)*;
- *World Area Forecast System Study Group (WAFSSG)*;
- *Low Level Wind Shear and Turbulence Study Group (WISTSG)*;

- *Satellite Distribution System for Information Relating to Air Navigation (SADIS)*;
- *Aerodrome Meteorological Observing Systems Study Group (AMOSSG)*.

Beispielsweise führt ICAO mit Unterstützung von AMOSSG eine detaillierte Überprüfung der meteorologischen Beobachtungssysteme durch. Im speziellen soll AMOSSG das ICAO Sekretariat bei der Kapazitätsanalyse und geforderter Auslegung zukünftiger automatischer Wetterbeobachtungssysteme unterstützen. Weiterhin ist ICAO auf internationaler Ebene das Bindeglied zur WMO.

6.2. EUROCONTROL

EUROCONTROL, die europäische Organisation für Sicherheit im Luftverkehr, hat als primäre Aufgabe die Entwicklung eines nahtlosen europaweiten *Air Traffic Management Systems (ATM)* zum Ziel und entwickelt, koordiniert und implementiert die kurz- und langfristigen Strategien hierzu. Die verschiedenen Betriebseinrichtungen von EUROCONTROL decken den gesamten Bereich der Luftverkehrskontrolle, der Entwicklung neuer Technologien bis hin zur Gebührenverwaltung ab. EUROCONTROL fördert u.a. Forschungsprogramme und betreibt ein eigenes *Research & Development Center*.

Als ein am Wetter orientiertes Vorhaben von EUROCONTROL können die Untersuchungen zu Vereisung angeführt werden (Bendisch et al., 2002). Verspätungsanalysen, auch mit dem Verspätungsgrund Wetter, werden von der CODA-Gruppe, basierend auf Daten der *Central Flow Management Unit (CFMU)*, und der Fluggesellschaften von IATA und AEA erstellt und veröffentlicht. EUROCONTROL unter-

stützt u.a. die Verbesserung der *All-Weather Operations*. Die Integration verbesserter Bodenführungssysteme A-SMGCS mit den kombinierten Ankunfts- und Abflugmanagementsystemen AMan und DMan, die Nutzung von Flächennavigationstechniken RNAV, die schrittweise Einführung der zukünftigen präzisen ICAO Landehilfen unter Nutzung der Satellitennavigation, optimierter Streckenführung um Flughäfen und die gemeinsame Flugplanung benachbarter Flughäfen bilden die Voraussetzung für eine fortschreitende und kontinuierliche Verbesserung des Flugverkehrsbaus unter Schlechtwetterbedingungen im Rahmen der EUROCONTROL Strategie ATM2000+ mit dem Zeithorizont 2015. Insbesondere sollen die Abflug- und Landeraten bei schlechter Sicht verbessert werden.

Zur Strategie für die Verbesserung von Effizienz und Sicherheit des Flugverkehrs gehört die Kooperation zwischen ATS und MET Dienstleistern, mit dem Ziel die benötigten Informationen bzgl.

- Wind
- Gewitter, Vereisung, Turbulenz (*“severe weather”*)
- Vulkanasche
- Sichtweite und Wolken
- Scherung, Turbulenz und Wirbelschleppen
- Starkregen, Schneefall

rechtzeitig und maßgeschneidert für die Flughäfen und die Flugplanungen bereit zu stellen. Dazu gehört auch die Verteilung, Integration und Darstellung von Informationen.

Eine erhöhte Genauigkeit und Aktualität der Vorhersagen für diese Elemente wird eine genauere Berechnung des Flugverlaufs erleichtern und damit die Güte im

ATM Netz verbessern und letztlich damit auch die Effizienz des gesamten Luftverkehrs erhöhen. Schlechtwetterbedingungen können schneller und zutreffender erkannt und in die Routenplanung mit einbezogen werden. Durch flexibles Wettermanagement kann die Sicherheit erhöht und Verspätungen reduziert werden.

Im Einzelnen will EUROCONTROL innerhalb ECAC zu den Themen

- Bestandsaufnahme gegenwärtiger Möglichkeiten, Entwicklungen und Lösungen
- Identifikation notwendiger Veränderungen und benötigter Fähigkeiten, die zukünftigen operationellen Anforderungen genügen
- Bereitstellung aktueller meteorologischer Daten im Cockpit
- Bereitstellung meteorologischer Infrastruktur und Leistungen an Flughäfen
- Minimierung des Umwelteinflusses durch den Luftverkehr
- Verbesserung der *en-route* Kapazität bei Schlechtwetterbedingungen
- Kostenerhebung, Kosten-Nutzen-Analysen
- gemeinsame Definition globaler Standards zusammen mit ICA und WMO
- Qualitätssicherung und Rückkopplung an meteorologische Dienstleister koordinierend beitragen.

6.3. Europäische Kommission

Auf Initiative der Europäischen Kommission wurde 2001 ein neues *Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE)* mit dem Ziel gegründet, eine neue Strategie für die Luftfahrtforschung in Europa zu entwickeln und zu implementieren. Diese *Strategic Research Agenda (SRA, bzw. SRA-2)* ist die Planungsgrundlage für die Forschungsförderung im

Bereich Luftfahrt (*aeronautics*) der Europäischen Kommission im 6. und 7. Rahmenprogramm.

In einem von 20 Vertretern der europäischen Luftfahrt erstellten Bericht „Vision 2020“, der ebenfalls explizit in die Ausschreibung zum 6. Rahmenprogramm eingegangen ist, wird als Teil der *Research Agenda* explizit hervorgehoben, den Einfluß des Wetters zu begrenzen. Ziel sei es, den störenden Einfluß des Wetters auf den Flugverkehr, den Komfort der Passagiere und die Sicherheit kontinuierlich zu mindern. Das sechste Rahmenprogramm fördert die Luftfahrtforschung substantiell¹.

Ziele sind:

- *Strengthening competitiveness by reducing development costs, aircraft direct operating costs and improving passenger comfort*
- *Improving the environmental impact with regard to emissions and noise*
- *Improving aircraft safety and security*
- *Increasing operational capacity and safety of the air transport system.*

Das kürzlich genehmigte Integrierte Projekt FLYSAFE, unter der Koordination von Thales Avionics, Toulouse, setzt sich u.a. zum Ziel, durch Bereitstellung von rechtzeitigen und maßgeschneiderten Wetterinformationen im Cockpit Wetterrisiken zu vermeiden und so die Sicherheit zu erhöhen. Es werden spezielle Vorhersageprodukte und bordeigene Meßsysteme für die den Flugzustand potentiell gefährdenden Phänomene *Gewitter, CAT/Turbulenz, Vereisung* und *Wirbelschleppen* entwickelt und untersucht. An diesem Projekt, das im Januar 2005 für vier Jahre starten soll, beteiligen sich auch mehrere meteorologische Einrichtungen und Forschungszent-

¹ Siehe hierzu insbesondere:
<http://www.cordis.lu/fp6/aerospace.htm>.

ren, u.a. UK Met Office, METEO France, DLR, ONERA und Universität Hannover.

6.4. Die Europäische Luftfahrtindustrie

Die *European Association of Aerospace Industries* (AECMA) formuliert ihre Vorstellungen zur Forschung unter dem Acronym ARTE 21 (*Aeronautical Research and Technology for Europe in the 21st Century*). Vier der fünf aufgestellten Herausforderungen und Ziele (*target concepts*) sind dabei mehr oder minder direkt mit dem Faktor Wetter verbunden:

- Umwelt / Grünes Flugzeug,
- Sicherheit / sicherer Flugbetrieb,
- Kapazität Verspätungen / *on-time aircraft operation*, ATM der Zukunft, Flughafen der Zukunft,
- Passagierkomfort / *passenger friendly aircraft operation*.

Aus Sicht der Industrie läßt sich die Vision 2020 in drei Aussagen zusammenfassen, wobei die zweite, in diesem Zusammenhang relevante, lautet:

Flugzeuge sind sauberer, sicherer, ruhiger und sie können in allen Wetterbedingungen fliegen. Der Flugverkehr wird sehr effektiv betrieben. (IMG3/ AECMA, 2001²)

6.5. Die Situation in den USA

In den USA spielt der Zusammenhang von Wetter und Flugverkehr bereits seit Ende der 20iger Jahre des letzten Jahrhunderts und mit-initiiert durch die Arbeiten des Schweden C.-G. Rossby über die Polarfront-Theorie eine große Rolle (Cox, 2002). Dies liegt zum einen bekannterma-

² IMG3/AECMA, Positionspapier, 2001, nähere Informationen unter www.aecma.org

ßen an der dominanten Rolle des Flugverkehrs im nationalen Verkehrswesen und zum anderen an den im Vergleich zu Europa deutlich ausgeprägteren Wettererscheinungen. Hurrikane und Blizzards gehören eben in den USA zu den alljährlich wiederkehrenden starken Wetterereignissen, die in Europa keine oder allenfalls eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Forschung zu dem Thema wird im wesentlichen vom *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) in Boulder getragen, im Verbund mit der *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), Abteilungen der NASA, dem *Massachusetts Institute for Technology* (MIT)¹ und verschiedenen Universitätsinstituten. Operationeller Partner ist das *Aviation Weather Center* in Kansas City. Wesentliche Triebkraft seit drei Jahrzehnten ist die *Federal Aviation Administration* (FAA), die durch substantielle Forschungsförderung maßgeblich zur Entwicklung von Vorhersage- und Diagnoseprodukten beigetragen hat. Insbesondere wurde das *Research Application Project* (RAP), heute eine eigene Abteilung des NCAR, unterstützt und aufgebaut.

In Kooperation mit den Nutzern wie Fluggesellschaften, Flughafenbetreibern, dem ATM, dem Wetterdienst und der Forschung wurde ein *Aviation Weather Plan* aufgestellt², der kontinuierlich weiterentwickelt und unter anderen Namen bis heute fortgeschrieben wurde. Entscheidend für den Erfolg dieser Teams war ihre relative finanzielle und organisatorische Selbständigkeit, insbesondere aber ihre Zusammensetzung. Denn man hatte von Beginn an sowohl die Forscher als auch die Endnutzer mit in jedes Team geholt.

Kernpunkt dieses Planes ist die Entwicklung von Produkten im Sinne von Vorhersage- und Diagnoseprodukten für jeweils spezifische Wetterprobleme. So gibt es u.a. ein *Convective Weather Product*, ein *Turbulence Product*, ein *Icing Product*. Die Entwicklung wurde in Produktentwicklungsteams durchgeführt. Die Produkte befinden sich in mittlerweile verschiedenen Versionen im Einsatz und können via Internet genutzt werden³.

Eine wichtige Rolle für die wissenschaftliche Kommunikation spielen die im zweijährigen Rhythmus abgehaltenen Tagungen der Amerikanischen Meteorologischen Gesellschaft (AMS) zu *Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*. Proceedings dieser Tagungen sind ein begehrtes Medium, da auch technisch und operationell geprägte Beiträge publiziert werden.

Begleitend zu den ersten experimentellen Produkten wurden Kosten-Nutzen-Analysen initiiert und hauptsächlich vom MIT durchgeführt. Diese Analysen zeigten sehr bald, daß der Nutzen bei weitem die erforderlichen F&E-Investitionen übersteigt. So führte beispielsweise die Einführung des *Integrated Terminal Weather Systems* ITWS, ein umfangreiches *Monitoringsystem*, an den Flughäfen Orlando, Dallas/Ft. Worth und um New York zur Reduktion der Verspätungen im Bereich von 10 bis 40%, die sich allein in New York auf 49000 reduzierte Verspätungstunden pro Jahr beliefen im Gesamtumfang von mehr als 150 Mio. US-\$ (MIT). Nach Bekundung von Jim Evans (MIT, private Kommunikation) sind nach dem Erfolg dieser Analysen weitere Kosten-Nutzen-Analysen nicht mehr geplant, da

¹ <http://www.ll.mit.edu/AviationWeather/index.html>

² Siehe z.B. Version von 1997 unter <http://aviation-safety.net/>

³ Unter <http://www.faa.gov/aua/awr/prodprog.htm> finden sich die von der FAA geförderten Wetterprodukte.

der Nutzen der Wetterprodukte mittlerweile unstrittig ist.

Parallel zur Einführung der diversen Produkte wurde mit der Qualitätsbestimmung und Qualitätssicherung begonnen. Diese stützen sich im Wesentlichen auf Pilotenbeobachtungen (PIREP) und können z.B. für die Vorhersage der Vereisung mit vierteljährlicher Erneuerung im Internet abgefragt werden¹. Zentrales Problem gerade bei der Vereisungsvorhersage ist eine zu konservative Warnung (*overforecasting*), die keine Akzeptanz mehr findet, da in den meisten Fällen keine tatsächliche Gefahr existiert.



Abbildung 6.1: Das *Integrated Terminal Weather System* und seine Komponenten.

Ein weiteres Element des *National Weather Plans* fußt auf der Erkenntnis, daß die zu entwickelnden Produkte nur in der Integration in das ATM Erfolg haben können. Man hatte frühzeitig bemerkt, daß die Produkte sehr genau auf die Bedürfnisse der Fluglotsen und allgemein der Nutzer zugeschnitten werden müssen, um

¹ Siehe <http://adds.aviationweather.noaa.gov> unter „icing“ und „CIP Performance Statistics“

Akzeptanz zu finden. Dies betrifft die zu betrachtenden Zeithorizonte, die zeitliche Verfügbarkeit, die Erneuerungsrate, Genauigkeit und die grafische Darstellung. Von daher war die Einbindung der Endnutzer in die Entwicklungsteams nicht nur sinnvoll sondern notwendig.

Die neuen Produkte wurden schwerpunktmäßig im Flughafennahbereich eingesetzt. Mittlerweile zeigte sich aber, daß zumindest in den USA nicht nur der Flughafennahbereich, sondern auch die Luftverkehrsstraßen und Luftkorridore, insbesondere im Osten, Engpässe darstellen. Der Nutzen der an Flughäfen eingesetzten Produkte, hier vor allem das *Convective Weather Product*, strahlte über den Flughafennahbereich hinaus aus und half, auch in den Korridoren für einen effizienteren Ablauf zu sorgen (Evans, 2002). Zukünftige Einsatzbereiche sind daher bevorzugt die Korridore.

Insgesamt läßt sich zur Situation in den USA sagen, daß man dort nun schon seit geraumer Zeit über die entsprechenden Organisation- und Förderstrukturen verfügt und mit den jetzt schon zur Verfügung stehenden Produkten große Erfolge erzielt hat, so daß der eingeschlagene Weg insgesamt unstrittig ist. Der Umfang der Förderaktivitäten auf dem Gebiet von Wetter und Flugverkehr nimmt weiterhin zu. Angesichts der in den vergangenen Sommern aufgetretenen Verspätungen im Luftverkehr nimmt jedoch auch der politische Druck auf alle Beteiligten zu.

6.6. Wirbelschleppenforschung und Entwicklung von Wirbelschleppensystemen

Im Bereich der Wirbelschleppenforschung und der Entwicklung geeigneter Warnverfahren gibt es zahlreiche Projekte, von denen viele durch intensive internationale Kooperation charakterisiert sind. Zu diesem Thema wurde 2001 ein Statuspapier¹ erstellt (Gerz et al. 2002).

Im DLR entwickelt man als Teil des DLR-internen Projektes Wirbelschleppes² ein integriertes System zur Wirbelschleppenvorhersage und -beobachtung (WSVBS), das dem Flugverkehrsmanagement erlauben soll, Paarung und Abstand landender Flugzeuge je nach Prognose des Wirbelverhaltens dynamisch anzupassen. Die Prognose des Wirbelschleppenverhaltens basiert auf einer lokal um den Flughafen räumlich und zeitlich hochauflösenden Wettervorhersage, aus der Wind, Temperatur und Turbulenz als Höhenprofile abgeleitet werden. Mit diesen Profilen errechnet ein Echtzeitmodell Transport und Zerfall der Wirbel inklusive Sicherheitszuschlägen. Aus den Wirbelprognosen können schließlich Vorschläge zur Flugzeugstaffelung abgeleitet werden, die an die Luftraumkontrolle eines Flughafens weitergegeben werden. Natürlich müssen Wetter- und Wirbelvorhersage durch Messungen der entscheidenden Parameter laufend überwacht werden.

Auf europäischer Ebene wurde das Thematische Netzwerk *WakeNet* aufgebaut, das mittlerweile in seiner 2. Phase als *Wa-*

keNet2-Europe existiert und auch in den USA als *WakeNet-USA* nachgeahmt wird. Die USA und Europa setzen gerade auf dem Gebiet der sicherheitsrelevanten Belange der Wirbelschleppenproblematik auf intensiven Austausch und Kooperation. Die beiden Netzwerke bilden ein Forum für Spezialisten aus Forschung, Flugzeugherstellern, Flugsicherung, Luftfahrtbehörden und Pilotenvereinigungen.

Auf der *Homepage* von *WakeNet2-Europe*³ findet man auch Informationen zu weiteren EU-Projekten wie *EuroWake*, *WAVENC*, *C-Wake*, *S-Wake*, *MFLAME*, *I-Wake* und *AWIATOR*. Diese EU-Projekte decken ein weites Spektrum der Wirbelschleppenforschung ab und gehen dabei teilweise deutlich über die hier vorgestellten Ansätze mit einem zentralen Bezug zum Wetter hinaus.

Weltweit wurden verschiedene Systeme zur Bereitstellung dynamischer Wirbelschleppenstaffelungen entwickelt. Jedoch wird bis heute noch keines dieser Systeme operationell genutzt. Die DFS entwickelt das Wirbelschleppenwarnsystem *WSWS* am Flughafen Frankfurt, welches bereits in den 80er Jahren initiiert wurde (Gurke & Lafferton 1997, Frech et al. 2002). Die beiden eng benachbarten Bahnen mit einem Abstand von 518 m erlauben keinen unabhängigen Betrieb, da Wirbelschleppen von der einen zur anderen Bahn driften könnten. Das *WSWS* benutzt ein statistisches Verfahren, welches ausgehend von Messungen einer Kette von Anemometern in Kombination mit einem Transport- und Zerfallsmodell für Wirbelschleppen die Nichtgefährdungszeiten für die jeweilige benachbarte Bahn vorhersagt. Bei geeigneten Windbedingungen und unter Instrumentenflugbedingungen (IMC) kön-

¹ Das vollständige Statuspapier zur Wirbelschleppenforschung in Europa online als position-paper.pdf: <http://www.onecert.fr/projets/WakeNet2-Europe/publications.htm>

² Siehe <http://www.pa.op.dlr.de/wirbelschleppe>

³ Siehe <http://www.onecert.fr/projets/WakeNet2-Europe/index.htm>

nen damit prinzipiell die benachbarten Landebahnen unabhängig betrieben werden. Das WSWS ist technisch implementiert, wird aber noch nicht für die Staffelung eingesetzt. Da das WSWS nur für Höhen bis 80 m über Grund konzipiert ist, wird zur Zeit an der Ausdehnung des WSWS auf den Höhenbereich bis 1500 m und den gesamten Anflugbereich gearbeitet. Ein zu diesem Zwecke von der DFS beschaffter Windprofiler hat seinen Betrieb am Frankfurter Flughafen aufgenommen. Speziell entwickelte Kurzzeitwindprognosen werden derzeit getestet.

Ebenfalls für die Optimierung der Anflugstaffelung am Flughafen Frankfurt wurden gemeinsam von DFS und Fraport das *High Approach Landing System* (HALS) bzw. *Dual Threshold Operation* DTOP entwickelt (z.B. Frech 2001). Zwei Flugzeuge mit Radarmindestabstand landen um 80 m in der Höhe und um 518 m seitlich versetzt. Das höher anfliegende Flugzeug landet hinter einer Schwelle, die 1500 m hinter der Schwelle der Nachbarbahn liegt. Das System wird momentan getestet und soll unter CAT-1 und IMC Bedingungen arbeiten.

Die Forschungszentren CERFACS und STNA in Toulouse entwickelten SYAGE (*Systeme Anticipatif de Gestion des Espacements*), das Bodenwindmessungen und ein Wirbelschleppenmodell nutzt, um die Abflugstaffelung für eine Landebahn zu optimieren (Le Roux & Corjon, 1997). Das System wurde für Testzwecke am Flughafen Paris-Orly installiert.

Die NASA erstellten AVOSS (*Aircraft Vortex Spacing System*, Hinton et al. 2000), um wetterabhängige Staffelungskriterien für eine Landebahn bereitzustellen.. AVOSS stellt die momentanen und vorhergesagten Wetterbedingungen unter IMC

Bedingungen bereit und prognostiziert den Wirbelschleppenzerfall. Die Funktionalität des Systems wurde im Juli 2000 am Flughafen Dallas/ Fort Worth demonstriert. In dem gemeinsam von NASA und FAA finanzierten Nachfolgeprojekt WakeVAS wird in einem Dreistufenplan die Anbindung solcher für individuelle Flughäfen maßgeschneiderte Systeme an ATC/ATM vorangetrieben, ähnlich dem europäischen ATC-Wake-Projekt.

Die FAA entwickelt SOIA, das *Simultaneous Offset Instrumented Approach* Verfahren für den Flughafen San Francisco (Spitzer et al. 2000), wo die Landebahnen nur um 225 m versetzt sind. Das System soll, unter IMC Bedingungen und wenn die Wolkenuntergrenze nicht niedriger als 1600 Fuß ist, einen unabhängigen Betrieb beider Bahnen erlauben.

Die Flugzeuge fliegen dabei mit einem lateralen Mindestabstand von 3000 Fuß bis zum *missed approach* Punkt in 1000 Fuß Höhe. Die restlichen 3.3 nautischen Meilen bis zur Landung werden dann unter Sichtflugbedingungen zurückgelegt. Simulator-tests, Training und Wirbelschleppenmonitoring wurden bisher durchgeführt (Greene et al. 2001).

6.7. World Area Forecast Centre (WAFIC) London

Der englische Wetterdienst betreibt ein WAFIC, das zweite ist in Washington. Seit 1984 werden internationale und globale Vorhersageprodukte entsprechend Annex 3 der ICAO Vereinbarung zur Zivilen Luftfahrt bereitgestellt. Dazu zählen:

- Höhenwind und Temperaturen für alle Flugniveaus zweimal am Tag,

- Karten mit signifikantem Wetter (SIGWX) alle 6 Stunden für Flugfläche FL250 und darüber, für alle internationalen Flüge über Europa, Naher Osten, Asien, Australien und dem Atlantik,
- Standardprodukte OPMET, TAFs, METARs und SIGMETs,
- *Volcanic Ash Advisory Centre (VAAC)* speziell für UK, Island und nordöstlicher Atlantik.

7. Änderungsbedarf

Hier werden Informationen und Vorschläge basierend auf dem bisher bekannten Änderungsbedarf zusammengetragen, die als Grundlage für weitere Diskussionen und Abstimmungsprozesse anzusehen sind.

7.1. Identifizierte Probleme und artikulierter Bedarf

Die Ergebnisse des 1. Fachgesprächs des Arbeitskreises *Luftverkehr und Wetter* am 26.6.01 in Langen lassen sich zu folgenden Kernaussagen zusammenfassen:

- Mit den zunehmenden Kapazitätsengpässen großer Flughäfen, insbesondere am Flughafen Frankfurt, nimmt der Einfluß signifikanter Wettererscheinungen zu.
- Moderne Entwicklungen des ATM erfordern als Entscheidungsgrundlage nutzergerechte Wetterprognosen mit verbesserter räumlicher und zeitlicher Genauigkeit. Das System der Kapazitätssteuerung erwartet eine frühzeitige, punktgenaue Wettervorhersage.
- Von besonderer Bedeutung ist die Vorhersage der folgenden, nach ihrer Bedeutung gereihten Wetterelemente: Gewitter, Schnee, Eis und Vereisung, Starkwindssysteme und Scherwinde sowie *Low Visibility/Low Ceiling* Bedingungen.
- Der Dialog zwischen den am operativen Betrieb beteiligten Entscheidungsträgern ist zu verbessern (*collaborative decision making*). Das gegenseitige Problemverständnis ist zu vertiefen.

- Die gemeinsamen Kommunikations- und Informationstechniken (z.B. Wetterradardarstellung für Fluglotsen) sind zu verbessern, die Produktpalette wetterdienstlicher Leistungen ist zu modernisieren.

Mit dem vorliegenden Statusbericht wird dokumentiert, auf welchem Gebiet und in Bezug auf welche der in Langen angesprochenen Kernpunkte Fortschritte erzielt wurden.

7.2. F & E - Bedarf

Legt man die Entwicklung in den USA zugrunde und vergleicht die Situation dort mit der hier in Deutschland, so sind die weiteren Schritte schon vorgezeichnet. Es herrscht sicherlich Konsens darüber, daß die Forschung auf dem Gebiet Wettereinfluß auf den Flugverkehr weiter vorangetrieben werden muß.

Ist-Analyse. Sie ist als Fundament für die weiteren Schritte unerlässlich:

- Quantitative Analyse des Wettereinflusses auf den Flugverkehr; aufgeschlüsselt nach (a) Sicherheit, (b) Effizienz; (c) Flughäfen, (d) Wetterfaktoren, (e) allgemeine, kommerzielle und militärische Luftfahrt, (f) Regionen Europas, (g) Verspätungsmaßen (*scheduled times vs. qualities*);
- Analyse der Verspätungserfassung in Deutschland und Europa (Codes);
- Identifikation und Analyse der Mechanismen, wie Wetter auf den Verkehr und Verkehrsleitsysteme wirkt;
- Theoretische Modellierung von Verkehrsabläufen, z.B. mit Warteschlangenmodellen, ähnlich wie für Straßenverkehr.

Produktentwicklung. Ähnlich der als erfolgreich anzusehenden Vorgehensweise in den USA wird vorgeschlagen, für die einzelnen Wettergefahren spezielle Vorhersageprodukte zu entwickeln (siehe weiter unten). Der Bedarf richtet sich hauptsächlich an die Kurzfristvorhersage (*nowcasting*). Diese Produkte sollen sich genau an den Bedürfnissen der Nutzer orientieren und hinsichtlich Zeitskalen, Datenverfügbarkeit, Genauigkeit, Ausfallsicherheit und grafischer Darstellung entsprechend ausgelegt sein. Die Einbindung der Nutzer in die Produktentwicklungsteams ist daher zwingend.

Implementierung, Test, Qualitätssicherung, Kosten-Nutzen Untersuchung. Nach der Entwicklungsphase, für die ein Zeitraum von 5 Jahren als realistisch angesehen wird, folgen erste Implementierungen in den laufenden Betrieb von Flughäfen, Flugsicherung und Wetterdienst mit entsprechenden Tests. Parallel sollten Systeme zur Qualitätssicherung und –feststellung entwickelt und aufgebaut werden. Die Verbesserung des PIREP-Meldeverfahrens und die Nutzung von Flugzeugdaten z.B. im Rahmen des AMDAR-Projektes erscheinen geboten. *Last not least* sind einige Kosten-Nutzen-Untersuchungen vorzusehen, um den quantitativen Gewinn der Maßnahmen zu verdeutlichen.

7.3. Zielfelder oder Querschnittsaufgaben

Man kann sich weiterhin überlegen, welche Zielfelder definiert werden können und welche Querschnittsaufgaben sich stellen.

(1) Markt- und Entwicklungsanalyse

Aufgabe: Wer ist mit welcher Priorität an diesem Produkt interessiert? Was

sind die Kostenreduktionspotentiale? Kostennutzenanalysen. Was gibt es so oder in ähnlicher Form schon? Welche Gruppen haben hier schon Vorarbeit geleistet? Auf was kann ggf. aufgebaut werden? Gibt es ähnliche europäische und internationale Projekte? Wo gibt es Synergiepotentiale in einer potentiellen europäischen und/oder internationalen Zusammenarbeit?

(2) Beobachtungssysteme und Daten

Aufgabe: Welche Beobachtungssysteme und/oder Meßsysteme sollen für dieses Produkt zum Einsatz kommen? Welche davon gibt es schon? Wo müssen Eigenentwicklungen durchgeführt werden? Wer hat das Know-how hierzu? Welche Hersteller gibt es? Welche Kosten entstehen? Beispiele: Windprofiler, Radar, Blitzmeßnetze, Lidar. Aufteilung in (i) *A/C-remote sensing* und/oder in-situ Meßsysteme, (ii) bodengestützte *Remote-Sensing* Systeme, (iii) satellitengestützte Systeme wie MSG, NOAA-Satelliten, ENVISAT etc., (iv) Integrierte Systeme wie *Integrated Terminal Weather System* (ITWS).

(3) Modelle

Aufgabe: Identifikation und Sichtung existierender Vorhersage- und/oder Nowcastingmodelle für das jeweilige Wetterphänomen. Bewertung vorhandener Modelle. Strategien, wie Modelle eingesetzt werden sollten: Einbezug und/oder Stützung auf Meßsysteme, Initialisierung, Nesting, Vorhersagegüte für jeweiliges Produkt.

(4) F&E Bedarf

Aufgabe: Definition der Forschungs- und der Entwicklungsaufgaben für das jeweilige Produkt.

(5) Integration in ATM oder Nutzeroperationen

Aufgabe: Klärung wer wann und wie genau welche Informationen benötigt.

Entwicklung, Test und Evaluation von Integrationsstrategien.

(6) *Kommunikation und Verbreitung*

Aufgabe: Wer braucht wieviel Information und in welcher Form? Nutzernahe und nutzerfreundliche graphische Systeme; Mensch-Maschine Schnittstelle; Werkzeuge zur Nutzung der Informationen; Aufbau von Datenlinks, Datenbanken; „Wetter im Cockpit“ (europäischer Projektvorschlag FLYSAFE); Kostenaspekte; Gebührenfrage; Rolle der Piloten; automatische PI-REPS.

(7) *Realisierung der Produktentwicklung*

Aufgabe: Festlegung der geeigneten Organisationsstruktur; z.B. Produktentwicklungsgruppe bestehend aus Entwicklern und Nutzern, mit Projektstruktur incl. Etat nach amerikanischem Vorbild; Priorisierung der Produkte, Finanzplanung, Kostenabschätzung, Kostenrahmen, Finanzierung, Projektüberwachung.



Abbildung 7.1: Meteorologin Sharon Lau erläutert die am Flughafen Hongkong operationell eingesetzten Meßsysteme zur Wind- und Turbulenzüberwachung (LIDAR, Doppler Radar, Bodenmeßnetz, Windprofiler¹).

¹ Siehe: <http://gb.weather.gov.hk/aviat>

7.4. Produkte

Es erscheint sinnvoll, für jeden Wetterfaktor ein eigenes Produkt zu entwickeln: Gewitterprodukt, Vereisungsprodukt, Nebelprodukt. Entsprechende Namen sollten noch gefunden werden. Für jedes Produkt müssen bestimmte Fragen, Untersuchungen, Analysen etc. gemacht werden: die Zielfelder oder Querschnittsfelder. Beispiele sind: Meßgeräteentwicklung, Marktanalyse, Integration in ATS, Darstellungs- und Kommunikationsform.

Vorhersageprodukte müssen in die operationelle ATC-Umgebung eingebunden werden. Damit sind hohe Sicherheitsanforderungen verbunden.

Anforderungen seitens Nutzer (ATM, Fluggesellschaft, Flughafen) an die meteorologischen Produkte müssen definiert und – wenn möglich – quantifiziert werden; z.B. Genauigkeit und Verlässlichkeit der meteorologischen Informationen (Messung und Vorhersage). Diese können für jedes Produkt verschieden sein.

Produkte mit hoher Priorität auf nationaler Ebene.

(1) *Wind im Flughafennahbereich*

Aufgabe: *Nowcasting* des 3d-Windfeldes im Flughafennahbereich (< 50 km), insbesondere Windrichtungsänderungen, die eine Anflugrichtungsänderung erforderlich machen.

Bezug: (a) Wirbelschleppenvorhersage, (b) lärmreduzierende An- und Abflugverfahren.

(2) *Gewitter*

Aufgabe: *Nowcasting* von Gewittern im Flughafennahbereich, insbesondere (2.1) Eintreffen eines Gewitters am Flughafen bzw. längs der Einflug-

schneisen und (2.2) Ende des Gewittereinflusses (30 Minuten im Voraus), (2.3) Hagelwarnung, (2.4) *Downbursts* / Scherung, (2.5) Tornados (selten), (2.6) Starkniederschlag, (2.7) Vereisung, (2.8) Turbulenz, (2.9) Blitzschlag. Bezug: (a) Sichtweite, (b) Vereisung im Streckenflug.

(3) *Sicht*

Aufgabe: *Nowcasting* von Nebel und niedrigen Wolken: Sichtweite, Eintritt und Auflösung von Nebel (insbesondere bei längeren Nebelereignissen), Dicke der Nebel- und/oder Wolken-schicht, Sichtweite bei Schnee, Starkniederschlag, Gewitter.

Bezug: (a) Gewitter, (b) Schneefall, COST Aktion.

(4) *Wirbelschleppen*

Aufgabe: Entwicklung und Demonstration eines Systems zur Vorhersage und Beobachtung von Wirbelschleppen (WSVBS). Dazu gehört die Vorhersage von (Quer-) Wind, Temperatur und Turbulenz im Höhenbereich bis 1500 m für einen Zeithorizont von wenigen Minuten bis 1 Stunde. Zunächst Beschränkung auf Flughafen Frankfurt (spezielle Situation eng benachbarter Landebahnen), Unterstützung vorhandener Aktivitäten der DFS, eventuell Ausdehnung auf andere Flughäfen (z.B. München). Wirbelschleppenvorhersage und -monitoring für den Reiseflug zur Vermeidung von Wirbelschleppenbegegnungen auf Flugstraßen infolge der reduzierten vertikalen Separation.

Bezug (a) Wind im Flughafennahbereich, (b) Sicherheit im An- und Abflug, (c) Sicherheit *en-route*.

(5) *Schneefall*

Aufgabe: *Nowcasting* von Schneefallereignissen am Flughafen, insbesondere (5.1) Beginn und (5.2) Ende, (5.3) Schnee am Boden (wg. Räumfahrzeuge), Eis auf Landebahn, (5.4) Kurzzeitvorhersage (<10 min) für Enteisungssteuerung.

Bezug: (a) Sichtweite, (b) Optimierung der Flächenräumung, (c) Optimierung des Enteisungsmanagements, (d) verbesserte Bremswegberechnung.

(6) *Vereisung*

Aufgabe: *Nowcasting* von vereisungsgefährdeten Lufträumen (speziell SLD-Bedingungen) in Europa (LM Gebiet), Weiterentwicklung von ADWICE.

Bezug: (a) Wolken jeglicher Art mit unterkühltem Flüssigwasser, (b) Schneefall, (c) gefrierender Regen und Niesel.

Produkte mit mittlerer Priorität auf nationaler Ebene.

(7) *Turbulenz*

Aufgabe: Diagnose von CAT und Wellen über Bergen, spez. Alpen, insbesondere (7.1) genauer Höhenbereich, (7.2) horizontale Erstreckung, (7.3) Diagnose des Endes, (7.4) TKE/EDR Vorhersage und Messung für Wirbelschleppenwarnsysteme.

(8) *Optimale Routenwahl*

Aufgabe: Optimierung der Routen längs von und nach Deutschland gehender Routen, unterschiedliche Optimierungsstrategien: (i) Zeit, (ii) Energie, (iii) Lärm (im Flughafennahbereich), (iv) Umwelt (Abgase + Lärm) im Flughafennahbereich.

(9) *Starkniederschlag*

Aufgabe: *Nowcasting* von Starkniederschlägen im Flughafennahbereich, ins-

besondere Wasser auf der Start- und Landebahn. Kapazitätsminderung, Bremswegberechnung.

Bezug: (a) Gewitter, (b) Schneefall, (c) Sicht.

(10) *Fluglärm*

Aufgabe: Schallausbreitung und Vorhersage, Grundlagen für eventuelle Lärmkontingentierungsmaßnahmen, lärmreduzierte An- und Abflugverfahren, Lärmbelastungsberechnungen.

(11) *Kondensstreifen*

Aufgabe: Kondensstreifenvorhersage, Routenwahl mit minimierter Kondensstreifenwahrscheinlichkeit, Kondensstreifenklimatologie.

(12) *Vogelzug*

Vorhersage von nennenswerten Vogelzügen, bevorzugte Flugzeiten, Flugstrecken, Vogelart, Flughöhen, insbesondere im Flughafenbereich und in Tieffluggzonen.

Produkte ohne Relevanz auf nationaler Ebene.

(13) *Vulkanasche*

Diagnose wird international bereits abgedeckt. Die verfügbaren Produkte sind natürlich bei internationalen Flügen von großer Relevanz.

Militärischer Flugverkehr. Militärischer Flugverkehr wird von denselben Wetterphänomenen betroffen wie der zivile Flugverkehr, jedoch können die Prioritäten als auch die Einwirkungen verschieden sein. So spielen beispielsweise für Tiefflüge von Kampffjets die Sichtbedingungen, die Vereisung und der Vogelschlag eine besondere Rolle. Die Belange des militärischen Flugverkehrs werden in diesem Dokument nicht betrachtet.

7.5. Einbindung der Aktivitäten in das nationale, europäische und internationale Umfeld

Es muß gewährleistet sein, daß geplante nationale Aktivitäten mit internationalen abgestimmt und koordiniert werden. Hierfür bietet sich die Kooperation der Wetterdienste untereinander im Rahmen der WMO und ICAO in hervorragender Weise an.

8. Glossar

ACARE	Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
ADV	Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen
ADWICE	Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environments
AEA	Association of European Airlines
AECMA	European Association of Aerospace Industries
AEROCNTRAIL	Formation Processes and Radiation Properties of Particles in Aircraft Wakes
AERONOX	The Impact of NO _x Emissions from Aircraft upon the Atmosphere at Flight Altitudes 8-15 km
AGARD	Advisory Group for Aerospace Research & Development
AIRMET	Airman's Meteorological Information
AMAN	Arrival Management
AMDAR	Aircraft Meteorological Data Relay
AMOSSG	Aerodrome Meteorological Observing Systems Study Group
AMS	American Meteorological Society
ARTE21	Aeronautical Research and Technology for Europe in the 21st Century
ASHTAM	Volcanic Ash NOTAM
A-SMGCS	Advanced Surface Movement Guidance and Control System
ATC/ATM	Air Traffic Control / Management
ATFM	Air Traffic Flow Management
ATS	Air Traffic Service
AVOSS	Aircraft Vortex Spacing System
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
BMVg	Bundesministerium der Verteidigung
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CAPCO	Capacity Performance Control
CAT	Clear Air Turbulence
CAT-1	Bezeichnung für Sichtbedingungen an einem Flughafen
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CFMU	Central Flow Management Unit
CLOUDMAP	Cirrus and Contrail Cloud-Top Maps from Satellites for Weather Forecasting and Climate Change Analysis
CNS/ATM	Communication, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management
CODA	Central Office for Delay Analysis
COST	European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research
CRYOPLANE	Liquid Hydrogen fuelled Aircraft
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMan	Departure Management
DTOP	Dual Threshold Operation
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECAC	European Civil Aviation Conference
EDR	Dissipationsrate der turbulenten kinetischen Energie
EU	Europäische Union
EULINOX	European Lightning NO _x Experiment
EURICE	European Research on Aircraft Icing Certification
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation
FAA	Federal Aviation Administration

FATIMA	Financial Assistance for Transport Integration in Metropolitan Areas
F&E	Forschung und Entwicklung
FIR	Flight Information Region
FL	Flight Level
Fraport AG	Frankfurt Airport Company
GAMET	General Aviation Meteorological Information
HALS	High Approach Landing System
HGF	Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren
IAS	Institute of Aeronautical Sciences
IATA	International Air Transport Association
ICA	International Council on Archives
ICAO	International Civil Aviation Organization
IFALPA	International Federation of Airline Pilot's Associations
IFL	Intermediate Flight Level
IFWS-F	Integriertes Flugwetter System - Frankfurt
IIFA	Integrated Icing Forecast Algorithm
IMC	Instrument Meteorological Conditions
IMuK	Institut für Meteorologie und Klimatologie, Universität Hannover
INCA	Interhemispheric Differences in Cirrus Properties from Anthropogenic Emissions
INFOMET	Meteorologische Information des DWD
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPA	Institut für Physik der Atmosphäre (DLR)
ITWS	Integrated Terminal Weather System
LFZ	Luftfahrzeug
LM	Lokal-Modell des DWD
LMK	Lokal Modell Kurzzeit des DWD
LuftVG	Luftverkehrsgesetz
METAR	Meteorological Aerodrome Routine Weather Report
METEO France	French Weather Service
METLINKSG	Meteorological Information Data Link Study Group
MetOffice	British Weather Forecasting Service
METEOSAT	Meteorological Satellite
METRIC	Metrics of Climate Change
MIT	Massachusetts Institute for Technology
MSG	METEOSAT 2 nd Generation
NASA	National Aeronautics & Space Administration
NCAR	National Centre for Atmospheric Research
NLR	Nationaal Lucht en Ruimtevaartlaboratorium (NL)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOTAM	Notice To Airman
NTSB	National Transportation Safety Board
NWV	Numerische Wettervorhersage
OFCM	Office of the Federal Coordinator for Meteorology
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
OPMET	Operational Meteorological
PAZI	Projekt Partikel und Zirren
PIREP	Pilot Weather Report
POLINAT	Pollution from Aircraft Emission in the North Atlantic Flight Corridor
QinetiQ	QinetiQ Holdings Ltd. (früher DERA, GB)
RAND	RAND Corporation, http://www.rand.org/randeurope/
RAP	Research Application Project
RACOP	Reduced Airport Capacity Operations
RNAV	Area Navigation
SADIS	Satellite Distribution System for Information Relating to Air Navigation

SAE	Society of Automotive Engineers
SFC	Surface
SIGMET	Significant Meteorological Advisory
SIGWX	Significant Weather
SLD	Super-cooled Large Drops
SOBER	Sonic Boom European Research Programme
SOIA	Simultaneous Offset Instrumented Approach
SPECI	Sonderwettermeldung
SRA	Strategic Research Agenda
STNA	Service Technique de la Navigation Aérienne
SYAGE	Système Anticipative de Gestion des Espacements
TAF	Terminal Area Forecast
TKE	Turbulente kinetische Energie
TMA	Terminal Control Area
TOMS	Total Ozone Mapping Spectrometer
TRADEOFF	Aircraft Emissions-Contribution of different Climate Components to Changes in radiative Forcing-Trade-off to reduce atmospheric Impact
TREND	Teil des METAR: Entwicklungsvorhersage für die nächsten 2 Stunden
VAAC	Volcanic Ash Advisory Centre
VAAS	Volcanic Ash Advisory Statement
VAFTAD	Volcanic Ash Forecast Transport and Dispersion Model
VAWSG	Volcanic Ash Warnings Study Group
VC	Vereinigung Cockpit
WAFC	World Area Forecast Centre
WAFS	World Area Forecast System
WAFSSG	World Area Forecast System Study Group
WakeNet2-Europe	European Thematic Network on Aircraft Wake Vortices
WakeVAS	Wake Vortex Advisory System der NASA
WISTSG	Low Level Wind Shear and Turbulence Study Group
WMO	World Meteorological Organization
WSVBS	integriertes System zur Wirbelschleppenvorhersage und –beobachtung
WSWS	Wirbelschleppenwarnsystem am Flughafen Frankfurt

9. Literatur

9.1. Allgemein

ADV, zitiert am 24.11.2003: ADV-Monatsstatistik, Dezember 2002. *Online* unter http://www.adv-net.org/download/presse/lvs2002_dez_adv.pdf

AGARD, 1989: Flight in Adverse Environmental Conditions. *AGARD Conference Proc. No. 470*, Gol, Norway, from 8 to 11 May 1989, NATO.

Amendola, A., G. Mingione, D. Cailhol, T. Hauf, 1998: EURICE: A European effort for the improvement of in-flight aircraft icing safety. *36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, January 12-15 (1998) Reno, NV.

Bendisch, J., G. Dean, B. Gerlach, T. Hauf, A. Hoff, C. Leifeld, and O. Kraft, 2002: Estimation of the Benefits from Improved Icing Forecasts. EEC Report, EUROCONTROL Experimental Centre.

Cox, J. D., 2002: Storm watchers. Kapitel 22: C.-G. Rossby, S. 182, Wiley & Sons, 252 S.

ECAC & EUROCONTROL, 2001: Study on Constraints of Growth, March 2001.

Eichenberger, W., 1995: Flugwetterkunde – *Handbuch für die Fliegerei*. Motorbuchverlag, 355 S.

EUROCONTROL, zitiert am 21.11.03: CODA, Delays to Air Transport in Europe. Febr. 2002. *Online* unter http://www.eurocontrol.int/eCoda/codarep/2002/0202_full.pdf

Elmore, K.L., D. McCarthy, W. Frost, and H.P. Chang, 1986: A high-resolution spatial and temporal multiple Doppler analysis of a microburst and its application to aircraft flight simulation. *J. Clim. Appl. Met.*, **25**, 1398-1425.

Evans, J. E., 1995: Safely reducing delays due to adverse terminal weather, *International Workshop on Modelling and Simulation in Air Traffic Management*, Springer, 185–202.

Evans, J. E., K. Carusone, M. Wolfson, B. Crowe, D. Meyer, and D. Klinge-Wilson, 2002: The Corridor Integrated Weather System (CIWS). *10th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, 13-16 May 2002, Portland, Oregon, U.S.A.

FAA, 1999: Appendix C, Airworthiness standard: Transport category airplanes, Part 25, *Aeronautics and Space*, Vol. 14, U.S. Code of Regulations, Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration (Available from Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20402-9328).

Guan, H., S. G. Cober, and G. A. Isaac, 2001: Verification of supercooled cloud water forecasts with in-situ aircraft measurements. *Wea. and Forecasting*, **16**, No. 1, 145–155.

Hong, G., S. G. Cober, G. A. Isaac, 2001: Verification of cloud forecasts with in-situ aircraft measurements. Preprint, *18th conference on weather analysis and forecasting*, 30 July-2 August 2001, Ft. Lauderdale, Florida.

ICAO: Annex 3 – Meteorological Service for International Air Navigation, ICAO publication.

ICAO: Manual of the ICAO Standard Atmosphere (extended to 80 kilometres or 262500 feet), Doc 7488, ICAO publication.

ICAO: Manual of Aeronautical Meteorological Practice, Doc 8896, ICAO publication.

ICAO: Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices, Doc 9328, ICAO publication.

ICAO: Manual on Co-ordination between Air Traffic Services and Aeronautical Meteorological Services, Doc 9377, ICAO publication.

ICAO: Manual on the Provision of Meteorological Service for International Helicopter Operations, Doc 9680, ICAO publication.

ICAO: Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemicals Clouds, Doc 9691, under development, ICAO publication.

ICAO: Wind Shear, Circular 186, *ICAO publication*.

- ICAO, zitiert am 21.11.2003: Observing, forecasting and reporting of low-level wind shear, Chapter 5 of WIST Manual. *Online* unter <http://www.icao.int/anb/sg/wistsg/Manual/chapter5.pdf>
- IPCC: Third Assessment Report – Climate Change, 2001.
- Lane, T. D., R. D. Sharman, T. L. Clark, and H.-M.Hsu, 2003: An investigation of turbulence generation mechanisms above deep convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **60** No. 10, 1297–1321.
- Lau, S. Y., 2000: Windshear and Turbulence Detection and Warning At Hong Kong Observatory, *World Meteorological Organization, Reprint 371*, zitiert am 21.11.03. *Online* unter <http://www.hko.gov.hk/aviat/articles/r371.pdf>
- Leifeld, C., 2004: Weiterentwicklung des Nowcastingsystems ADWICE zur Erkennung vereisungsgefährdeter Lufträume, *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Nr. 224, Offenbach am Main, 118 S.
- Lenoir, N., and J.-C. Hustache Ecole, 1997: 1st USA / Europe ATM R&D Seminar, Saclay, France, 17–20 Juni.
- Malcolm, J., 1987: Tornadoes or microbursts ? *Met. Mag.* **116**, 43-50.
- McDonald, F., B. Bernstein, and M. Politovich, 2003: The Forecast Icing Potential (FIP). Report to the FAA Aviation Weather Technology Transfer Board, Techn. Ber., NCAR, Boulder, Colorado, 30 S.
- Meischner, P., R. Baumann, H. Höller, and T. Jank, 2001: Eddy Dissipation Rates in Thunderstorms Estimated by Doppler Radar in Relation to Aircraft In Situ Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **18**, 1609-1627.
- Miller, E., 1991: Volcanic ash and aircraft operations. *Prep. 4th Int. Conf. Aviation Weather Systems* (Paris, France, 24-28 May, 1991), 378-383.
- MIT, zitiert am 21.11.2003: Massachusetts Institute of Technology, New York ITWS. *Online* unter <http://www.ll.mit.edu/AviationWeather/index4.html#benefits>
- NRC (National Research Council), 1983: Low-Altitude Wind Shear and its Hazard to Aviation. National Academic Press.
- NTSB, zitiert am 21.11.2003: National Transportation Safety Board, Aviation Accident Database & Synopses. *Online* unter http://www.nts.gov/ntsb/brief.asp?ev_id=20001213X32505&key=1.
- OFCM, 1992: National Aviation Weather Program Plan, FCM-P27-1992, Federal Coordinator for Meteorology.
- Peer, C., 2004: An evaluation of forecasts of weather parameters causing aircraft departure and arrival delays at Vienna International Airport. Diploma thesis.
- Pielke, Jr., R. A., and R. E. Carbone, 2002: Weather impacts, forecasts, and policy: An integrated perspective. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 393–403.
- Reiber, M., 1998: *Moderne Flugmeteorologie – Wissen, Praxis, Flugsicherung*. Verlag Harri Deutsch, 232 S.
- Roach, W. T., and J. Findlater, 1983: An aircraft encounter with a tornado. *Met. Mag.* **112** (2), 1327.
- Robinson, P., 1989: The influence of weather on flight operations at Atlanta Hartsfield International Airport. *Weather and Forecasting, December*, 461–468.
- Sanchez et al., 1998: Giant Supercooled Drops in Cb. *EGS XXIII General Assembly*, Nice 20-24 April, 1998.
- Sankey, D. A., G. J. Kulesa, D. J. Pace, W. L. Fellner, J. E. Sheets, and P. J. Kirchoffer, 2000: Activities of the Federal Aviation Administration's Aviation Weather Research Program. *9th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Orlando, U.S.A.

- Sasse, M., and T. Hauf, 2003: A study of thunderstorm-induced delays at Frankfurt Airport, Germany. *Meteorol. Appl.*, **10**, 21–30.
- Schumann, U., J. Ström, F. Arnold, T. K. Berntsen, P. M. de F. Forster, J.-F. Gayet, and D. Hauglustaine, 2001: Aviation impact on atmospheric composition and climate. *European Research in the Stratosphere 1996-2000*, Chapter 7, European Commission, Brussels, EUR 19867, 257–307.
- Spehr U., 2003: Analyse des Wettereinflusses auf die Pünktlichkeit im Flugverkehr. Diplomarbeit, Universität Hannover, Institut für Meteorologie und Klimatologie, 95 S.
- Spehr U., and T. Hauf: 2003: Analyse des Wettereinflusses auf die Pünktlichkeit im Flugverkehr, Interner Bericht für den Flughafen Frankfurt, Universität Hannover, Institut für Meteorologie und Klimatologie, 88 S.
- Tafferner, A., T. Hauf, C. Leifeld, T. Hafner, H. Leykauf, and U. Voigt, 2003: ADWICE: Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environments. *American Meteorological Society, Weather and Forecasting*, **18**, No. 2, 184–203.
- White, P. W., 1987: Impact of weather forecasts on aviation fuel consumption. *The Meteorological Magazine*, **Vol. 115**, No. 1375, 29–31.
- Wolfson, M. M., R. L. Delanoy, B. E. Foreman, R. G. Hallowell, M. L. Pawlak, and P. D. Smith, 1994: Automated Microburst Wind-Shear Prediction. *The Lincoln Laboratory J.*, **7** No. 2. *Online unter* (zitiert am 24.11.2003) <http://www.ll.mit.edu/AviationWeather/wolfson.pdf>
- D'Amours, R., 1994: Current and future capabilities in forecasting the trajectories, transport and dispersion of volcanic ash clouds. *U. S. Geol. Survey Bull.*, **2047**, 325–332.
- Balderson, D., 1993: Assuring Aviation Safety after Volcanic Eruptions. *FAA Special Review*, March 1993, 35 pp plus appendices.
- Casadevall, T. J., 1994: The 1989 – 1990 eruptions of Redoubt Volcano, Alaska: Impacts on aircraft operations. *J. Volcanol. and Geotherm., Res.*, **62**, 301–316.
- Casadevall, T. J., 1994: Volcanic Ash and Aviation Safety. *U. S. Geol. Survey Bull.*, **2047**, 1–6.
- Casadevall, T. J., and M. D. Krohn, 1995: Effects of the 1992 Crater Peak eruptions on airports and aviation operations in the United States and Canada. *U. S. Geol. Survey Bull.*, **2139**, 205–220.
- Heffter, J. L., and B. J. B. Stunder, 1993: Volcanic ash forecast transport and dispersion (VAFTAD) model. *Weather. Forecasting*, **8**, 533–541.
- Johnson, R. W., and T. J. Casadevall, 1994: Aviation safety and volcanic ash clouds in the Indonesia-Australia region. *U. S. Geol. Surv. Bull.*, **2047**, 191–197.
- Krueger, A. J., L. S. Walter, P. K. Bhartia, C. C. Schnetzler, N. A. Krotkov, I. Sprod, and G. J. S. Bluth, 1995: Volcanic sulfur dioxide measurements from the total ozone mapping spectrometer instruments. *J. Geophys. Res.*, **100**, 14057–14076.
- Miller, E., 1991: Volcanic ash and aircraft operations. *Prep. 4th Int. Conf. Aviation Weather Systems*, Paris, France, 24-28 May, 1991, 378–383.
- Miller, T. P. and V. Y. Kirianov, 1996: Mitigation of volcanic ash hazards to aircraft across the North Pacific, *Abstracts for the Pan Pacific Hazards Conference and Trade Show*, p. 174.
- Rose, W. I., 1986: Interaction of aircraft and explosive eruption clouds: a volcanologist's perspective, *AIAA Journal*, **25**, 52–58.

9.2. Weitere Literatur: Vulkanasche

Albersheim, S. R., 1999: Towards a national plan for reporting volcanic ash. Preprints, *Eighth Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology*, Dallas, TX, 10–15 January, 1999, 313–316, American Meteorological Society.

Rose, W. I., and D. J. Schneider, 1996: Satellite images offer aircraft protection from volcanic ash clouds, *EOS*, **77**, 529–532.

Salina, L. J., 1999: Volcanic ash clouds pose a real threat to aircraft safety. Preprints, *Eighth Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology*, Dallas, TX, 10–15 January, 1999, 322–325, American Meteorological Society.

Schneider, D. J., W. I. Rose, and L. Kelley, 1995: Tracking of 1992 eruption clouds from Crater Peak/Spurr Volcano using AVHRR. *U. S. Geol. Surv. Bull.*, **2139**, 27–36.

Stunder, B. J. B., and J. L. Heffter: Volcanic ash encounter probabilities. *Eighth Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology*, Dallas, TX, 10–15 January, 1999, 335–337, American Meteorological Society.

Uecker, J., and E. L. McKay, 1991: The aeronautical volcanic ash problem. Preprints, *4th Int. Conf. Aviation Weather Systems*, Paris, France, 24–28 May, 1991, 270–273.

Wen, S., and W. I. Rose, 1994: Retrieval of Particle sizes and masses in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5. *J. Geophys. Res.*, **99**, 5421–5431.

9.3. Weitere Literatur: Kondensstreifen

Gierens, K., U. Schumann, H. H. J. Smit, M. Helten, and G. Zängl, 1997: Determination of humidity and temperature fluctuations based on MOZAIC data and parameterisation of persistent contrail coverage in general circulation models. *Ann. Geophys.*, **15**, 1057–1066.

Gierens, K., R. Sausen, and U. Schumann, 1999: A diagnostic study of the global coverage by contrails. Part II: Future air traffic scenarios. *Theor. Appl. Climatol.*, **63**, 1–9.

Gierens, K., U. Schumann, M. Helten, H. Smit, and A. Marengo, 1999: A distribution law for relative humidity in the upper troposphere and lower stratosphere derived from three years of MOZAIC measurements. *Ann. Geophys.*, **17**, 1218–1226.

Gierens, K., U. Schumann, M. Helten, H. Smit, and P.-H. Wang, 2000: Ice-supersaturated regions and subvisible cirrus in the northern midlatitude upper troposphere. *J. Geophys. Res.*, **105**, 22743–22753.

Jensen, E. J., O. B. Toon, S. A. Vay, J. Ovarlez, R. May, P. Bui, C. H. Twohy, B. Gandrud, R. F. Pueschel, and U. Schumann, 2001: Prevalence of ice-supersaturated regions in the upper troposphere: Implications for optically thin ice cloud formation. *J. Geophys. Res.*, **106**, 17253–17266.

Kärcher, B., 2000: Contrails: Observations, formation mechanisms, atmospheric impacts, uncertainties. Forschungsbericht, DLR-Mitteilung 2000-01, 47 pp.

Meerkötter, R., U. Schumann, P. Minnis, D. R. Doelling, T. Nakajima, and Y. Tsushima, 1999: Radiative forcing by contrails. *Ann. Geophys.*, **17**, 1080–1094.

Meyer, R., H. Mannstein, R. Meerkötter, U. Schumann, and P. Wendling, 2002: Regional radiative forcing by line-shaped contrails derived from satellite data. *J. Geophys. Res.*, in press.

Minnis, P., U. Schumann, D. R. Doelling, K. M. Gierens, and D. W. Fahey, 1999: Global distribution of contrail radiative forcing, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1853–1856.

Schröder, F., B. Kärcher, C. Duroure, J. Ström, A. Petzold, J.-F. Gayet, B. Strauss, P. Wendling, and S. Borrmann, 2000: The transition of contrails into cirrus clouds, *J. Atmos. Sci.*, **57**, 464–480.

Schumann, U., 1996: On conditions for contrail formation from aircraft exhausts. *Meteorol. Z.*, **5**, 4–23.

Schumann, U., 1999: Wie stark beeinflussen die Emissionen des Luftverkehrs Ozon und Klima? *GAIA*, **8**, 19–27.

Schumann, U., 2000: Influence of Propulsion Efficiency on Contrail Formation. *Aerospace Science and Technology*, **4**, 391–401.

Schumann, U., 2002: Aircraft Emissions. *Encyclopedia of Global Environmental Change*, Wiley, Vol. 3, 178–186.

Schumann, U., Contrail Cirrus, in D. K. Lynch, K. Sassen, D. O'C. Starr, and G. Stephens (Eds.), 2002: Cirrus. *Oxford Univ. Press*, 231–255.

Schumann, U., R. Busen, and M. Plohr, 2000: Experimental Test of the Influence of Propulsion Efficiency on Contrail Formation. *J. Aircraft*, **37**, 1083–1087.

Schumann, U., F. Arnold, R. Busen, J. Curtius, B. Kärcher, A. Kiendler, A. Petzold, H. Schlager, F. Schröder, and K.-H. Wohlfrom, 2002: Influence of fuel sulfur on the composition of aircraft exhaust plumes: The experiments SULFUR 1-7. *J. Geophys. Res.*, in press.

9.4. Weitere Literatur: Wirbelschleppen

Frech, M., T. Gerz, J. Carriere, and R. W. Lunnon, 2000: A definition of wake vortex behaviour classes, *American Meteorological Society*, S-Wake Technical Note 131-1.

Frech, M., and F. Holzäpfel, 2000: Sensitivity of a Wake Vortex Model to Meteorological Data. *EGS 2000*, Nice, France, 25-29 April 2000.

Frech, M., 2001: VORTEX-TDM – a parameterized wake vortex transport and decay model and its meteorological input data base. DFS-German Air Navigation Services, 57 pp.

Frech, M., F. Holzäpfel, T. Gerz, and J. Konopka, 2002: Short term prediction of the horizontal wind vector within a wake vortex warning system. *Meteorol. Appl.* **9**, 9-20.

Gerz T., F. Holzäpfel, and D. Darracq, 2002: Commercial aircraft wake vortices. *Progress in Aerospace Sciences*, **38**, 181–208.

Greene, G. C., R. P. Rudis, and D. C. Burnham, 2001: Wake turbulence monitoring at San Francisco. 5th WakeNet Workshop, 2./3. April 2001, Langen.

Gurke, T., and H. Lafferton, 1997: The development of the Wake Vortex Warning System for Frankfurt Airport: Theory and Implementation. *Air Traffic Control Quart* 1997, **5(1)**, 3–29.

Hinton, D. A., and C. J. O'Connor, 2000: Development of a Wake Vortex Spacing System for Airport Capacity Enhancement and Delay Reduction. *19th Digital Avionics Systems Conference*, Paper 3.E.6, Philadelphia, PA., October 7-13.

Holzäpfel, F., 2003: A Probabilistic Two-Phase Wake Vortex Decay and Transport Model. *J. Aircraft* **40**, No. 2, 323-331.

Holzäpfel, F., and R. E. Robins, 2004: Probabilistic two-phase aircraft wake vortex model: application and assessment. *J. Aircraft* **41**, No. 1, p. 10.

Roux, Le, and A. Corjon, 1997: Wake Vortex advisory system implementation at Orly Airport for departing aircraft. *Air Traffic Control Quarterly*, **5(1)**.

Spitzer, E. A, R. P. Rudis, J. N. Hallock, and G. C. Greene, 2000: Windline for parallel runway operations at San Francisco Airport. *XXV Assembly of the European Geophysical Society*, Nice, France, 25–29 April 2000.