

M. SAUER, T. GERZ

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

Weather and Air Traffic Management

Zusammenfassung

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

Abstract

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

1 Die Herausforderung

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

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

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

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

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

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

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

2 Wetter und Luftverkehrsmanagement

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

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

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

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

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

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

3 Wetter und Flugzeug

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

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

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

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

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

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

4 Integrierte Beobachtungs- und Vorhersagesysteme

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

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

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

5 Erhöhtes Situationsbewusstsein für das fliegende Personal

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

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

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

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

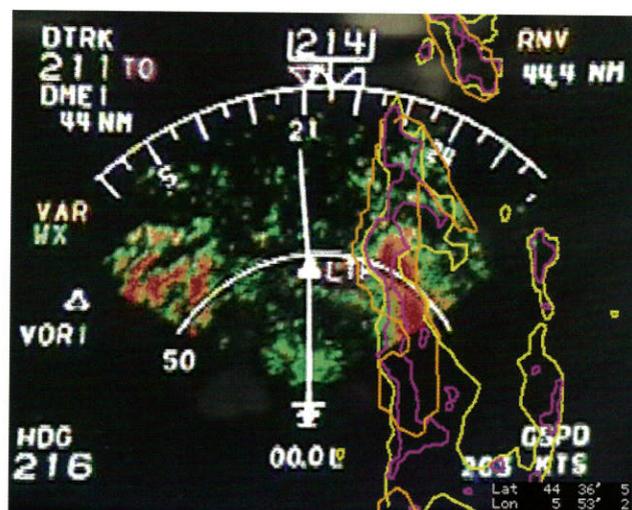


Abb. 5-1: Schnappschuss eines Videos der aufgezeichneten Reflektivitäten des Bordradars des französischen Forschungsflugzeuges SAFIRE ATR-42 nahe Grenoble am 19. August 2008 um 14:05 UTC. Dem Bild sind nachträglich die Konturen der vom Bodensystem detektierten Gewitterzellen überlagert. Die farbigen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

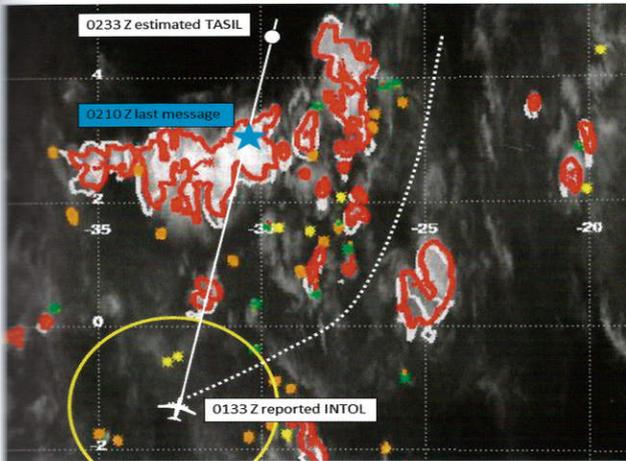


Abb. 5-2: METEOSAT-9-Infrarot-Bild über dem Atlantik östlich von Brasilien am 1. Juni 2009 um 01:30 UTC mit überlagerter Cb-TRAM-Analyse, tatsächlicher Flugroute, Positionen des Fluges AF447 und möglicher Ausweichroute. Die weißen Flächen markieren Gebiete mit sehr niedrigen Temperaturen und weisen auf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

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

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

6 Zukünftige integrale Luftverkehrs- und Wettersimulationen

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

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

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

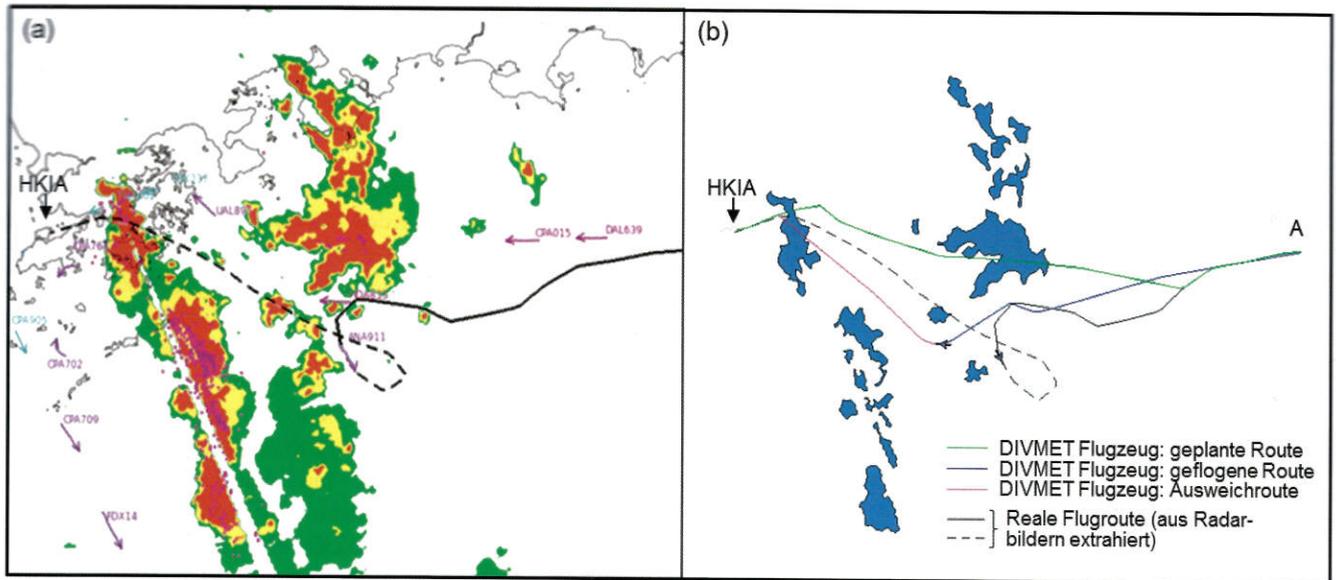


Abb. 5-3: (a) Stationäre Situation überlagerter Wetter- und Flugradarbilder des 8. September 2010 um 22:30 UTC. Das Feld konvektiver Zellen, das sich südwestlich durch die TMA des HKIA bewegt hat, ist anhand der je nach Echointensität (grün: < 31 , gelb: ≥ 33 bis < 41 , rot: ≥ 41 dBz) farblich abgegrenzten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

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

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

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

7 Bewertung und Ausblick

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

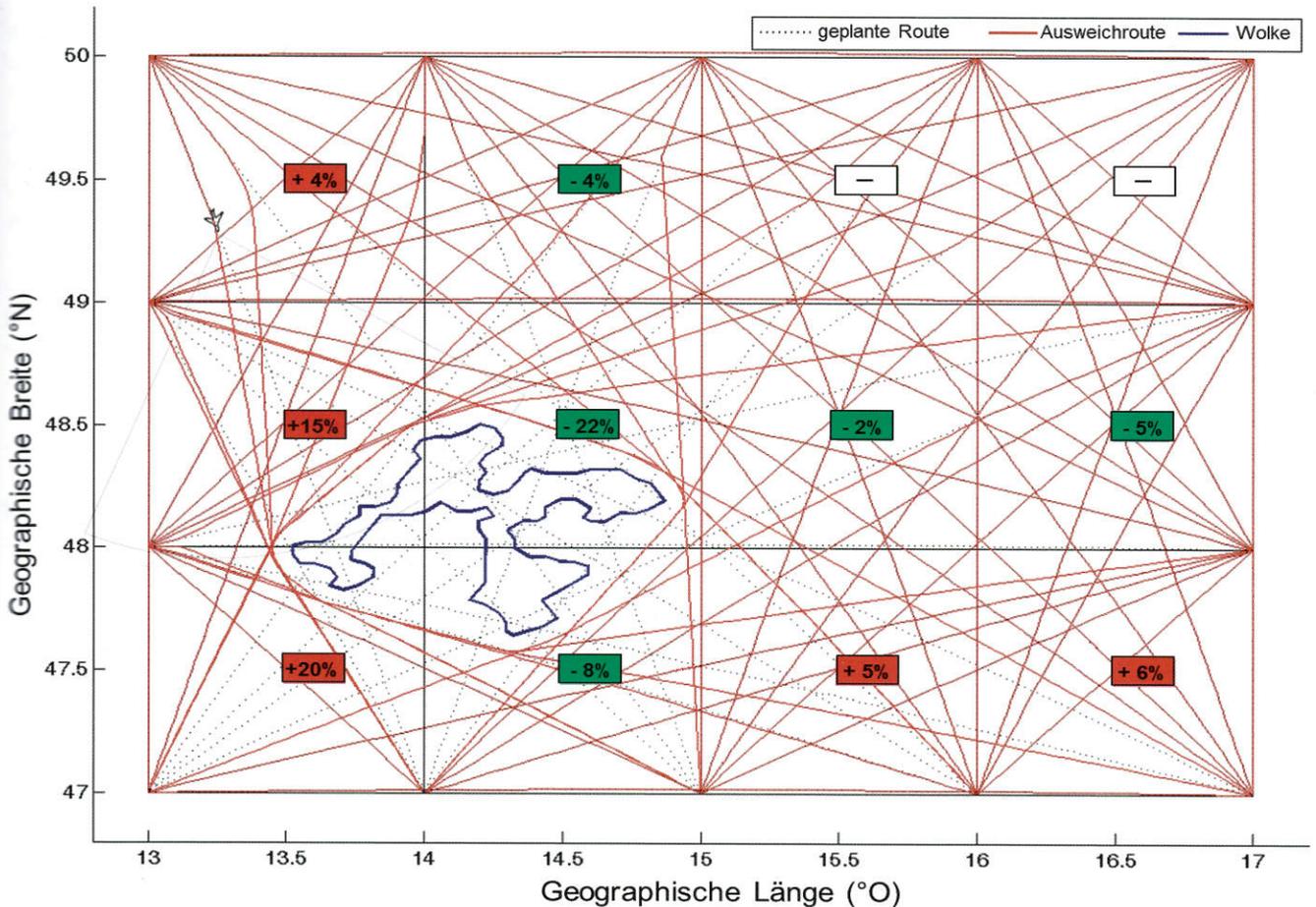


Abb. 5-4: Ergebnis einer Machbarkeitsstudie zur Bestimmung der Sektorbelastungsänderung aufgrund von Wetter. Das generische Setup umfasst 12 Sektoren von jeweils 1° x 1° Größe und insgesamt 63 geradlinige geplante Routen (schwarz gepunktet), die alle äußeren Punkte miteinander verbinden. Der Hauptverkehrsfluss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

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

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

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

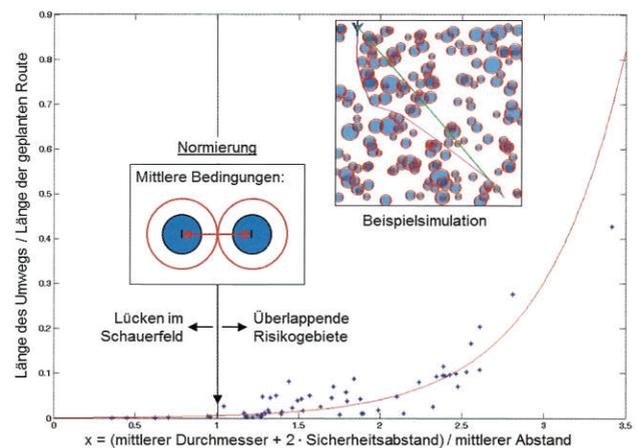


Abb. 5-5: Der Zusammenhang von Effizienz (Länge des Umweges) und Sicherheitsabstand x zum Objekt kann durch eine Exponentialfunktion angenähert werden. Der intuitive Zusammenhang zwischen Effizienz und Sicherheit wurde durch zahlreiche Modellläufe in unterschiedlich entwickelten Feldern zufällig verteilter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

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

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

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

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

Literatur

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

- gorithm Cb-TRAM. *Atmospheric Measurement Techniques* **6**, 1903-1918.
- NATS**, 2010: The effect of thunderstorms and associated turbulence on aircraft. Technical Note AIC: P 056/2010. *UK Aeronautical Information Service*: Hounslow, Middlesex.
- PRADIER-VABRE**, S., **FORSTER**, C., **HEESBEEN**, W., **W.**, M., **PAGÉ**, C., **SÉNÉSI**, S., **TAFFERNER**, A., **BERNARD-BOUSSIÈRES**, I., **CAUMONT**, O., **DROUIN**, A., **DUCROCQ**, V., **GUILLOU**, V., **JOSSE**, P., 2009: Description of convective-scale numerical weather simulation use in a flight simulator within the Flysafe project. *Meteorology and Atmospheric Physics*, DOI:10.1007/s00703-008-0317-4.
- RHODA**, D., **PAWLAK**, M., 1999: An assessment of thunderstorm penetrations and deviation by commercial aircraft in the terminal area. Project Report NASA/A-2. MIT Lincoln Laboratory: Lexington, MA, 77 pp.
- ROKITANSKY**, C., 2005: VDL Mode 2 Capacity Analysis through Simulations: WP3.B – NAVSIM Overview and Validation Results. Eurocontrol.
- ROKITANSKY**, C.H., **EHAMMER**, M., **GRÄUPL**, T., 2007: NEWSKY – Novel simulation concepts for future air traffic. In: Proceedings of *1st CEAS European Air and Space Conference*, Berlin, 10-13 September 2007, 611-618.
- SAUER**, M., **SAKIEW**, L., **HAUF**, T., **HUPE**, P., 2013: Some applications of the adverse weather diversion model DIVMET. *16th conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, 93th AMS Annual Meeting, Austin, TX, 6-10 Januar 2013, 9 pp.
- SCHUMANN**, U. (Hrsg.), 2012: Atmospheric Physics, Research Topics in Aerospace. *Springer*, DOI: 10.1007/978-3-642-30183-4_39.
- SÉNÉSI**, S., **GUILLOU**, Y., **TAFFERNER**, A., **FORSTER**, C., 2009: Cb nowcasting in FLYSAFE: Improving flight safety regarding thunderstorm hazards. *WMO Symposium on Nowcasting*, Whistler, B.C., Canada, 30 August - 4 September 2009.
- TAFFERNER**, A., **FORSTER**, C., **HAGEN**, M., **KEIL**, C., **ZINNER**, T., **VOLKERT**, H., 2008a: Development and propagation of severe thunderstorms in the Upper Danube catchment area: Towards an integrated nowcasting and forecasting system using real-time data and high-resolution simulations. *Meteorol. Atmos. Phys.* **101**, 211-227, DOI 10.1007/s00703-008-0322-7.
- TAFFERNER**, A., **FORSTER**, C., **SÉNÉSI**, S., **GUILLOU**, Y., **TABARY**, P., **LAROCHE**, P., **DELANNOY**, A., **LUNNON**, B., **TURB**, D., **HAUF**, T., **DANIJELA**, M., 2008b: Nowcasting Thunderstorm Hazards for Flight Operations: The CB WIMS Approach in FLYSAFE. *26th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, Anchorage, AK (USA), 14 September 2008, 10 pp.
- TAFFERNER**, A., **FORSTER**, C., **HAGEN**, M., **HAUF**, T., **LUNNON**, B., **MIRZA**, A., **GUILLOU**, Y., **ZINNER**, T., 2010: Improved thunderstorm weather information for pilots through ground and satellite based observing systems, *14th conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, 90th AMS Annual Meeting, Atlanta, GA, 17-21 Januar 2010.
- THALES AVIONICS**, 2010: FLYSAFE – WP 6.7.3 D6.7.3 - Final Publishable Report. 104 pp.
- ZINNER** T., **MANNSTEIN**, H., **TAFFERNER**, A., 2008: Cb-TRAM: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data. *Meteor. Atmos. Phys.* **101**, 191–210, DOI 10.1007/s00703-008-0290-y.
- ZINNER**, T., **BETZ**, H.-D., 2009: Validation of Meteosat storm detection and nowcasting based on lightning network data. In: Proceedings of the *EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2009*, Bath, UK, EUMETSAT P.55, ISBN 978-92-9110-086-6, ISSN 1011-3932, 8 pp.
- ZINNER**, T., **FORSTER**, C., **DE CONING**, E., **BETZ**, H.-D., 2013: Validation of the METEOSAT storm detection and nowcasting system Cb-TRAM with lightning network data - Europe and South Africa. *Atmospheric Measurement Techniques* **6**, 1567–1583, DOI:10.5194/amt-6-1567-2013.