

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

Literatur

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

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

Gewittervorhersage

Thunderstorm forecasting

Zusammenfassung

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

Summary

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

1 Einleitung

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

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

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

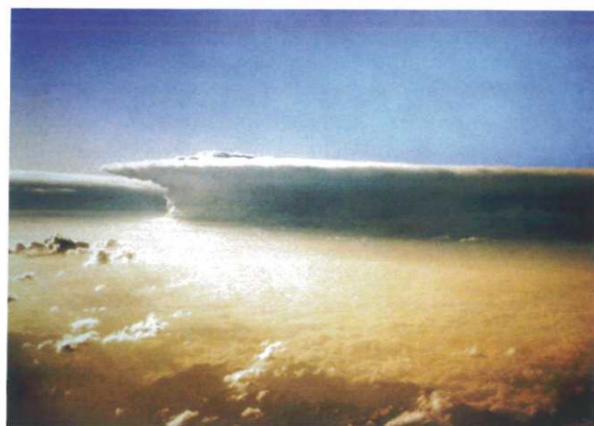


Abb. 16-1: Fotografie einer Gewitterwolke über dem nördlichen Voralpenland am 12. Juli 1984, aufgenommen um 17 UTC von F. D. Oltmans (Pilot) aus einem Flugzeug in 10 600 m Höhe. Nach Abschätzungen des Piloten basierend auf dem On-Board-Wetterradar war die Wolke war ungefähr 12 km hoch, ihr Amboss etwa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

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

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

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

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



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

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

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

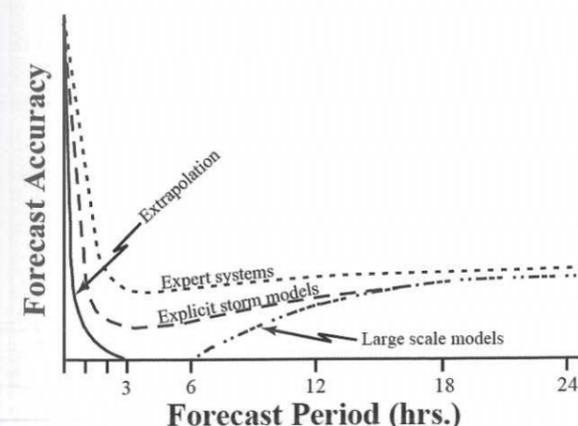


Abb. 16-3: Qualitative Darstellung der Vorhersagegenauigkeit als Funktion des Vorhersagezeitraums für konvektiven Niederschlag auf einer räumlichen Skala von wenigen Kilometern (WILSON et al. 1998).

2 Nowcasting-Methoden

In der Meteorologie werden verschiedene Nowcasting-Methoden unterschieden:

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

2.1 Konzeptionelle Modelle

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

2.2 Extrapolation

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

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

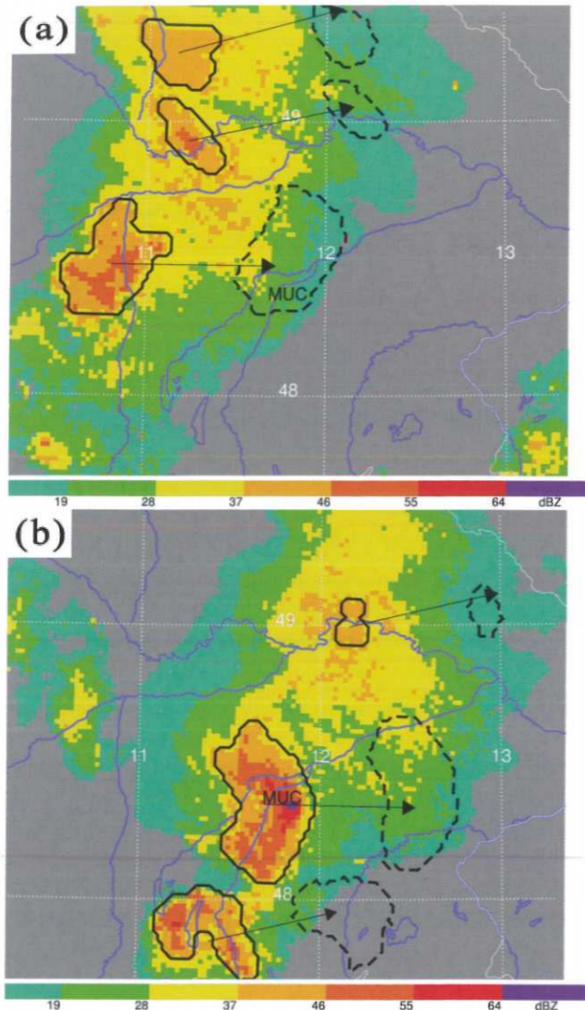


Abb. 16-4: Rad-TRAM Nowcasting-Beispiel für eine Region mit etwa 300 km x 300 km um den Flughafen München (MUC) am 21. Mai 2009 um (a) 16:15 UTC und (b) 17:15 UTC. Flüsse sind blau eingezeichnet. Auf dem Radarbild (farbiger Hintergrund) sind Rad-TRAM Gewitterzellen durch schwarze Konturen gekennzeichnet,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

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

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

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

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

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

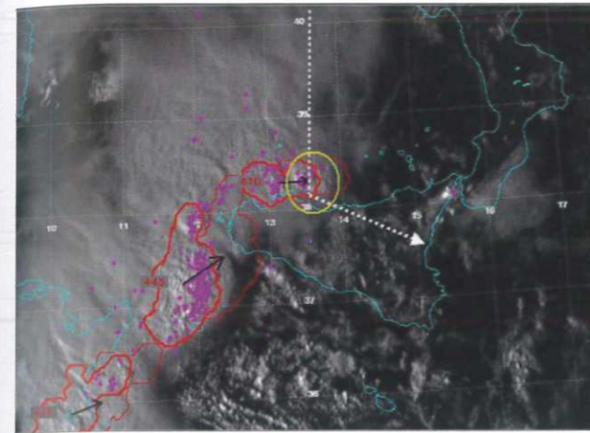


Abb. 16-5: Cb-TRAM Nowcasting-Beispiel, das ein hochauflösendes METEOSAT-Bild im sichtbaren Bereich mit detektierten (rote Konturen) und vorhergesagten (dünne rote Konturen) Cb-TRAM-Zellen zeigt. Die gestrichelte weiße Linie zeigt die ungefähre Flugroute des Airbus A319 am 1. Oktober 2009 auf seinem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

2.3 Numerische Vorhersage

Numerische Simulationen mit hoher Auflösung haben den Vorteil, dass alle physikalischen Prozesse, die für ein Wetterphänomen relevant sind, berücksichtigt werden. Dies gilt zum Beispiel für turbulente Durchmischung in der Grenzschicht, Wolken- und Niederschlagsprozesse, sowie Strahlung und Advektion. Abbildung 16-7 zeigt das Ergebnis einer Simulation einer Gewitterfront im Alpenvorland mit dem MM5-Modell. Die 3-D-Darstellung der Hydrometeore zeigt deutlich die konvektiven Zellen, insbesondere das Gewitter am Alpenrand, das auch zu dieser Zeit und an diesem Ort beobachtet wurde. Man kann deutlich die ambossartige Struktur in der Wolken-eisverteilung erkennen. Im Windfeld bei etwa 800 m Meereshöhe (etwa 200 m über Grund) ist eine Böenfront vor den konvektiven Zellen zu sehen. Obwohl es viele so erfolgreiche Simulationen wie diese gibt, kommt es, wie in der Einleitung bereits erwähnt, ebenso häufig vor, dass mesoskalige Wetterphänomene mit einer Ausdehnung von 10 bis 100 km überhaupt nicht oder zur falschen Zeit oder am falschen Ort vorhergesagt werden. Eine weitere Herausforderung ist es, den Lebenszyklus solcher Wetterphänomene (Entstehung, Entwick-



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

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

2.4 Vorhersage von Entstehung/Zerfall

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

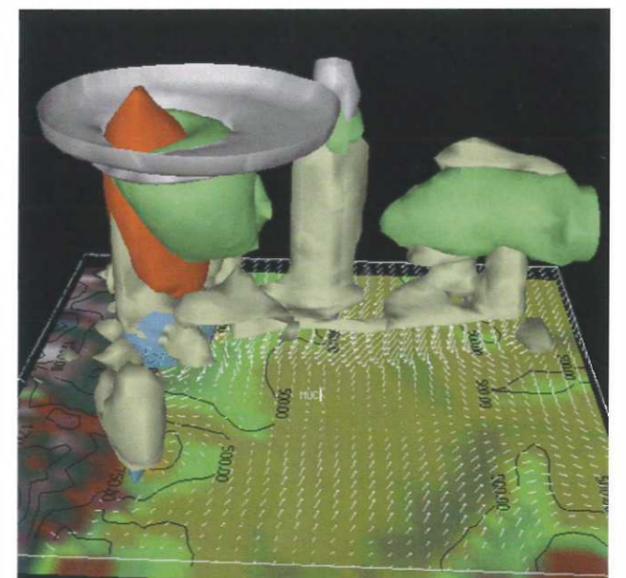


Abb. 16-7: Numerische Simulation einer Gewitterlinie, die am 12. August 2004 über das Alpenvorland zog. Dargestellt ist die dreidimensionale Hydrometeorverteilung aus einem Blickwinkel von Ost nach West um 19 UTC. Die Alpen befinden sich auf der linken Seite, MUC im Zentrum der Grafik. Der Ausschnitt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

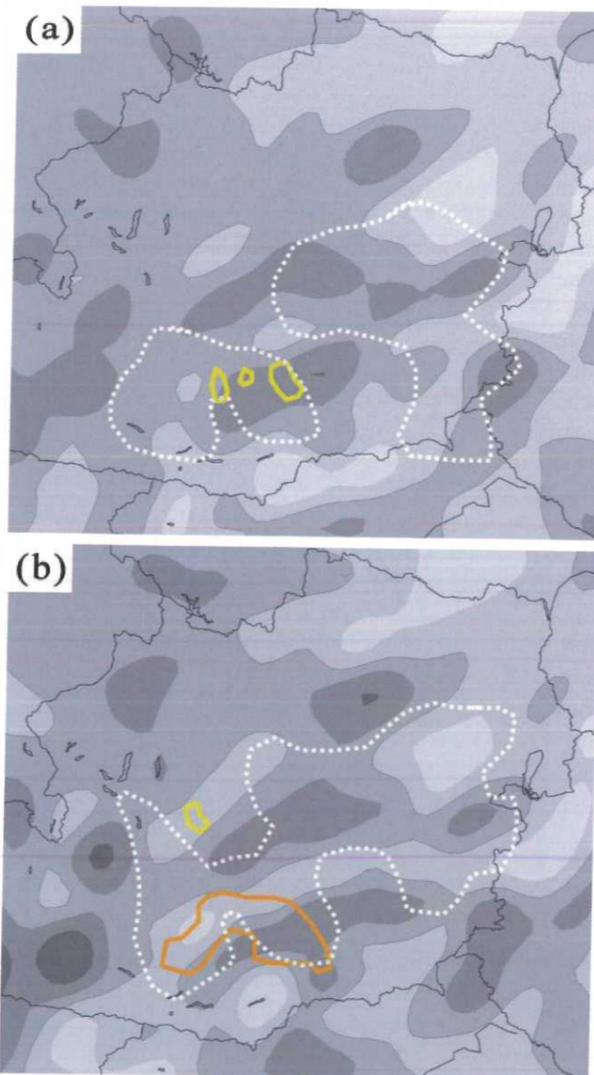


Abb. 16-8: Erste konvektive Entwicklung über dem Osten von Österreich am 25. Mai 2009 um (a) 11 UTC und (b) 12 UTC. Vorhersage der Aufwinde in 500 hPa aus dem COSMO-EU sind grau schattiert (je dunkler, je stärker). Weißgestrichelte Konturen markieren Gebiete mit Feuchtekonvergenz am Boden aus der VERA-Analyse.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

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

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

3 Integrierte Systeme für das Nowcasting und die Kurzfristvorhersage

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

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

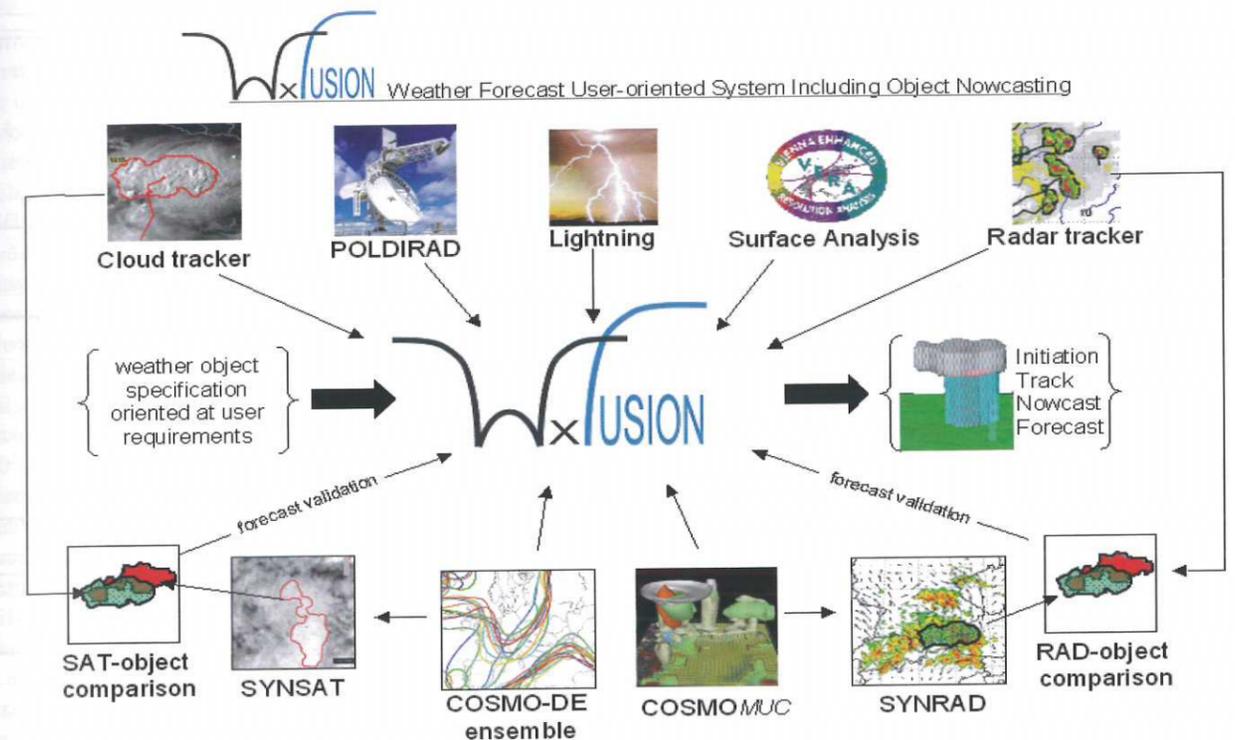


Abb. 16-9: Schematische Darstellung des integrierten Systems WxFUSION. Beobachtungsdaten und Nowcasting-Algorithmen (Elemente in der oberen Reihe) werden mit Daten aus numerischen Simulationen (Elemente in der unteren Reihe) verbunden, um ein vorher spezifiziertes Wetterobjekt zu analysieren, zu verfolgen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

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

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

Kombination mit den Nowcasting und Beobachtungsdaten verwendet werden.

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

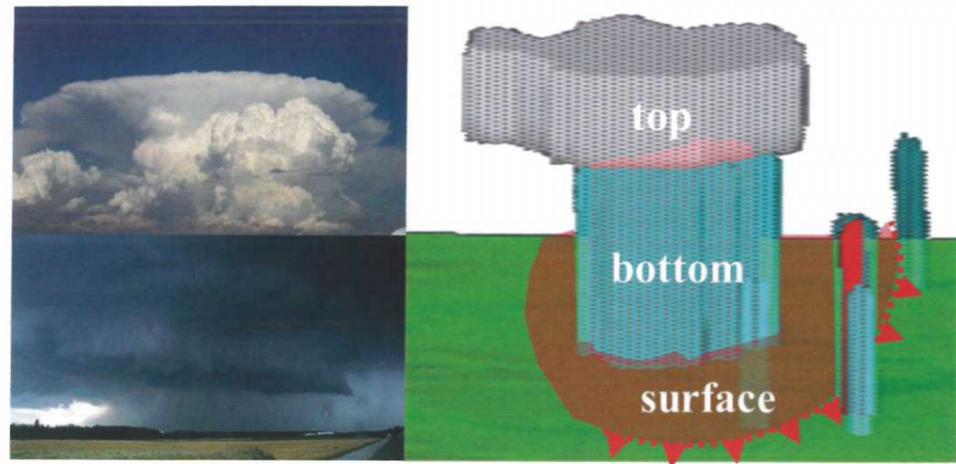


Abb. 16-10: Links: Fotografien eines Gewitters (oberes Foto: M. Köhler). Rechts: Gewitterobjekte rekonstruiert aus Nowcasting-Algorithmen (TAFFERNER et al. 2012).

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

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

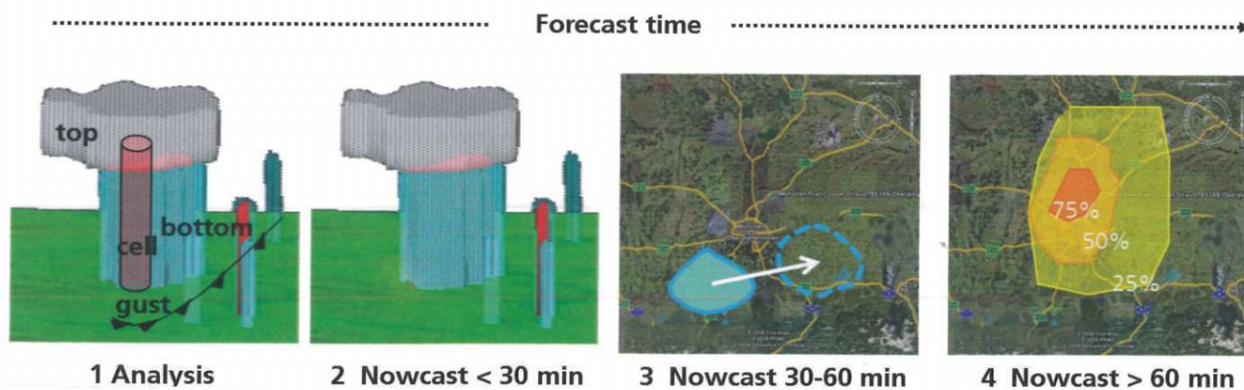


Abb. 16-11: Nowcasting: Mit fortschreitender Vorhersagezeit werden immer weniger Details zur Beschreibung des Objekts ausgegeben.

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

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

4 Abschließende Bemerkungen

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

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

Danksagung

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

Literatur

- BALDAUF, M., SEIFERT, A., FÖRSTNER, J., MAJEWSKI, D., RASCHENDORFER, M., REINHARDT, T., 2011: Operational convective-scale numerical Weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities. *Mon. Weather Rev.* **139**, 3887–3905.
- BETZ, H. D., SCHMIDT, K., OETTINGER, W. P., AND MONTAG, B., 2008: Celltracking with lightning data from LINET. *Adv. Geosci.* **17**, 55–61, doi:10.5194/adgeo-17-55-2008.
- BETZ, H. D., SCHUMANN, U., LAROCHE, P., (Eds), 2009: *Lightning: Principles, Instruments and Applications*. Springer, Heidelberg, 641 pp.
- BRETEL, S., 2010: Untersuchung des Lebenszyklus von Gewittern in Mitteleuropa mit Hilfe von Fernerkundungs- und Modelldaten. Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
- BROWNING, K. A., 1982: *Nowcasting*. Academic Press, London, 256 pp.
- CONWAY, B. J., 1998: An overview of nowcasting techniques. In: SAF Training Workshop- Nowcasting and Very Short Range Forecasting. EUMETSAT.
- COST 722, 2004: WWRP/NWP Expert Meeting. FMI, Helsinki, 9–11 June 2004.

- CRAIG, G., 2012: Probabilistic Weather Forecasting, in: *Atmospheric Physics*, edited by U. Schumann. Springer, DOI: 10.1007/978-3-642-30183-4.
- DENGLER, K., ANGER, J., KEIL, C., 2011: Validation of time-lagged ensemble forecasts relevant for predicting aircraft wake vortices. *Meteorol. Z.* **20**, 625–634.
- EVANS, J., DUCOT, E., 1994: The integrated terminal weather system (ITWS). *MIT Lincoln Laboratory J.* **7**, 2, 449.
- FORSTER, C., TAFFERNER, A., 2012: Nowcasting and forecasting thunderstorms for air traffic with an integrated forecast system based on observations and model data. WMO Symposium on Nowcasting, Whistler, B.C., Canada, 30 August - 4 September 2009.
- FORSTER, C., TAFFERNER, A., 2012: Nowcasting Thunderstorms for Munich Airport. Forschungsbericht, DLR, 14 pp.
- GERZ, T., SCHUMANN, U., 2013: Aviation (Hazards to), in: *Encyclopedia of Earth Sciences Series, Encyclopedia of Natural Hazards*, edited by P. T. Bobrowsky., Springer, 34-39, doi: 10.1007/978-1-4020-4399-4_8.
- GERZ, T., FORSTER, C., TAFFERNER, A., 2012 a: Mitigating the Impact of Adverse Weather on Aviation, in: *Atmospheric Physics*, edited by U. Schumann. Springer, DOI: 10.1007/978-3-642-30183-4.
- GERZ, T., FORSTER, C., TAFFERNER, A., 2012 b: Mitigating the impact of adverse weather on aviation. In: *Atmospheric Physics: Background - Methods - Trends Research Topics in Aerospace*. Springer, 645-660.
- HEIMANN, D., KURZ, M., 1985: The Munich Hailstorm of July 12, 1984—a discussion of the synoptic situation. *Beitr. Phys. Atmos.* **58**, 528–544.
- HÖLLER, H., REINHARDT, M.E., 1986: The Munich Hailstorm of July 12, 1984—convective development and preliminary hailstone analysis. *Beitr. Phys. Atmos.* **59**, 1, 1–12.
- KOBER, K., TAFFERNER, A., 2009: Tracking and nowcasting of convective cells using remote sensing data from radar and satellite. *Meteorol. Z.* **18**, 75–84, doi:10.1127/0941-2948/2009/359.
- KÖHLER, M., 2011: Untersuchung der Auslösung von Gewittern während der „Wetter und Fliegen“- Sommerkampagne 2010. Masterarbeit, DLR/IPA.
- LANG, P., PLÖRER, O., MUNIER, H., RIEDL, J., 2003: KONRAD - ein operationelles Verfahren zur Analyse von Gewitterzellen und deren Zugbahnen, basierend auf Wetterradarprodukten. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **222**.
- MUELLER, C., SAXEN, T., ROBERTS, R., WILSON, J., BETANCOURT, T., DETTLING, S., OIEN, N., YEE, J., 2003: NCAR auto-nowcast system. *Weather Forecast* **18**, 4, 545–561.
- STEINACKER, R., PÖTTSCHACHER, W., DORNINGER, M., 1997: Enhanced resolution analysis of the atmosphere over the Alps using the fingerprint technique. *Annalen der Meteorologie* **35**, 235–237.
- STICH, D., FORSTER, C., ZINNER, T., TAFFERNER, A., 2011: Convection initiation-nowcasting by data fusion and its verification. In: *European Conferences on Se-*

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

17

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

Aircraft Icing

Zusammenfassung

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

Summary

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

1 Vereisungsproblematik in der Luftfahrt

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

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

1.1 Vereisung am Boden

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