

Weiterentwicklung des Nowcastingsystems
ADWICE zur Erkennung
vereisungsgefährdeter Lufträume

Vom Fachbereich Physik der Universität Hannover

zur Erlangung des Grades

Doktor der Naturwissenschaften

Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Met. Christoph Leifeld

geboren am 14. November 1972 in Krefeld.

2004

Zusammenfassung

Unterkühltes Flüssigwasser (SLW, *supercooled liquid water*) ist in der Atmosphäre in einem Temperaturbereich von 0°C bis -40°C in Form von Wolken- und Niederschlagströpfchen vorhanden. Trifft dieses auf Flugzeuge, so bildet sich Eis, das zu signifikanten Änderungen in der Aerodynamik des Flugzeuges führen kann. Große, unterkühlte Tropfen (SLD, *supercooled large droplets*) mit Radien größer als 30 μm stellen ein besonders hohes Vereisungsrisiko dar.

In den Zulassungsverfahren, z.B. der *Federal Aviation Administration* (FAA) für Flüge in vereisungsgefährdete Lufträume, werden SLDs nicht berücksichtigt. An einer Überarbeitung der entsprechenden Zulassungsvorschriften wird weltweit gearbeitet. Methoden zur Erkennung von SLW und Vereisungsgefahr sowie Vereisungsinformationen und -warnungen, die auch der Deutsche Wetterdienst (DWD) herausgibt, werden von vielen Nutzern, insbesondere von Piloten, als dringend verbesserungsbedürftig angesehen. Flugunfälle, die auf Vereisung und speziell auf SLDs (z.B. Absturz einer ATR-72 in Roselawn Indiana, 1994) zurückzuführen sind, sowie unzureichende Warnungen führten aus meteorologischer Sicht international zur Entwicklung von Expertensystemen, die zur Verbesserung der Vereisungswarnungen beitragen sollen. Da numerische Wettervorhersagemodelle die für den Piloten relevanten Informationen wie Menge des SLW, Art (reine Flüssigphase, Eis-Wasser-Mischphase) und Tropfengrößenverteilung noch nicht mit ausreichender Güte simulieren können, verwenden die Expertensysteme zur Diagnose und Prognose von Wolken und Niederschlag mit SLW und damit Vereisungsgefahr ersatzweise andere Methoden und stützen sich neben Modelldaten auf Beobachtungsdaten. Für den mitteleuropäischen Luftraum wurde das Nowcastingsystem ADWICE (*Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environments*) in Kooperation zwischen dem DWD, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und dem Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover (IMUK) als Ableger des US-Expertensystems IIDA (*Integrated Icing Diagnostic Algorithm*) (MCDONOUGH und BERNSTEIN, 1999) entwickelt (TAFFERNER *et al.*, 2003). Erste Erfahrungen im prä-operationellen Betrieb offenbarten Schwächen, die auf eine nicht optimale Adaption des nordamerikanischen Verfahrens auf europäische Verhältnisse hinwiesen und weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich machten, die Gegenstand der Dissertation sind.

ADWICE V2 (Version 2), die Weiterentwicklung von ADWICE V1 (Version 1), zeichnet sich erstens dadurch aus, daß mit den neu entwickelten Algorithmen unter Verwendung von Modelldaten des Lokal-Modells des DWD's sowie Wetterbeobachtungs- und Radar-daten eine Diagnose und Vorhersage von Vereisungsgefahr möglich ist und zudem eine Differenzierung nach vier Vereisungsszenarien eine Aussage zur Tropfengröße und damit zur Vereisungsstärke zuläßt. Zweitens schöpft ADWICE V2 durch eine bisher in dieser Breite nicht verwendete Methodik den großen Informationsgehalt der Beobachtungsdaten optimal aus und hebt sich dadurch von vergleichbaren Systemen und insbesondere von ADWICE V1 ab. Eine Evaluierung anhand von drei unterschiedlichen Vereisungswetterlagen zeigt, daß ADWICE V2 die Wolken und den Niederschlag mit Vereisungspotential sowohl in der Prognose als auch in der Diagnose zutreffend beschreibt. Weiterhin zeigt sich, daß ADWICE V2 sowohl den Standardvereisungsprodukten als auch ADWICE V1 überlegen ist und damit einen Beitrag zu mehr Sicherheit im Luftverkehr leistet.

Weitere Beobachtungs- und Fernerkundungsdaten, die Hinweise auf Vereisungsgefahr im Luftraum liefern (z.B. Satellitendaten), könnten in Zukunft das System bereichern.

Abstract

In the atmosphere supercooled liquid water (SLW) exists as droplets in clouds and precipitation at subfreezing temperatures down to -40°C . If supercooled droplets get in contact with aircraft, they freeze and the resulting ice accretion may lead to a significant modification of aircraft aerodynamics. Supercooled large droplets (SLD) with radii greater than $30\ \mu\text{m}$ are extremely hazardous in that respect.

Current certification regulations for aircraft flying in icing conditions, e.g. from the Federal Aviation Administration (FAA), do not consider SLDs. However, it is a worldwide effort to include SLDs in the regulations. Methods to identify SLW as well as typical products to inform about and to warn against inflight-icing, provided by local weather services like the German Weather Service (DWD), need to be improved. Aircraft accidents due to icing and especially those caused by SLDs (e.g. ATR-72 crash in Roselawn Indiana, 1994) and the fact that the warnings against icing hazards were poor and insufficient resulted in a worldwide development of expert systems to improve icing forecasts. Since current numerical weather prediction models do not forecast SLW and drop-size distributions with sufficient accuracy, the expert systems rely on other methods to deduce the potential icing threat combining numerical model data with observational data. Following the concept of the US-expert system IIDA (Integrated Icing Diagnostic Algorithm) (MCDONOUGH und BERNSTEIN, 1999) ADWICE, the Advanced Diagnosis and Warning System for aircraft ICing Environments (TAFFERNER *et al.*, 2003), has been developed in joint cooperation of the DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), the DWD and the Institut für Meteorologie und Klimatologie (IMUK) at the University of Hannover. Preliminary experiences of the pre-operational phase at the DWD reveal weaknesses. This can be attributed to hardly optimized adaptation of ADWICE to European weather and data sources. Further research and development is needed to improve the system, which is the topic of the dissertation.

ADWICE V2 (version 2), the advanced system of ADWICE V1 (version 1), provides a forecast and a diagnosis of inflight-icing hazards by the newly developed algorithms using model data of the Lokal-Modell (LM) of the DWD, weather observations and radar data. The developed algorithms potentiate to classify the weather and cloud situation into four different icing scenarios, which make it possible to deduce a drop-size distribution in order to determine icing severity. Further more, ADWICE V2 processes all available data from the radar and weather observation network using a methodology, which so far has not been used in such a complex way by other systems. Therefore, ADWICE V2 stands out against other comparable inflight-icing systems.

An evaluation based on three different weather situations, including icing hazard, shows, that ADWICE V2 is able to forecast and diagnose the regions with icing-potential correctly. Additionally, the evaluation shows that ADWICE V2 is superior to ADWICE V1 and to the products provided by the DWD. Therefore ADWICE V2 is able to improve air traffic safety.

The use of other data sources, e.g. satellite data, may further improve the system in the future.

Keywords: ADWICE, inflight-icing, SLD

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
1 Einführung	10
2 Darstellung der Vereisungsproblematik	12
2.1 Wolkenphysikalische Grundlagen	12
2.1.1 Entstehung von Wolkentropfen durch Kondensation	12
2.1.2 Tropfenwachstum durch Koagulation	15
2.1.3 Eisbildung und die Rolle des unterkühlten Wolkenwassers	17
2.1.4 Vereisungspotential in konvektiver Bewölkung	19
2.1.5 Vereisungspotential in stratiformer Bewölkung	22
2.1.6 Vereisungspotential spezieller Wettersituationen	23
2.1.7 Vereisungspotential in unterkühlten Niederschlägen	23
2.2 Flugzeugvereisung	29
2.2.1 Tropfenkollision mit Flugzeug	29
2.2.2 Eisansatz und Eisansatzformen	30
2.2.3 Aerodynamische Erwärmung	33
2.2.4 Auswirkungen durch Eisansatz auf das Flugverhalten	34
2.2.5 Flugunfälle durch Eisansatz	35
2.2.6 Flugzeuggetragene Schutzvorrichtungen	36
3 Aktueller Stand in der Vereisungswarnung	38
3.1 Standardprodukte des DWD's	38
3.1.1 Methode zur Abschätzung eines Vereisungsgrades	39
3.1.2 Methode zur Erkennung von unterkühltem Flüssigwasser	41
3.1.3 <i>GAMETs</i> , <i>AIRMETs</i> und <i>SIGMETs</i>	42
3.1.4 <i>Low-Level Significant Weather Chart</i>	42
3.1.5 Zusammenfassung und erste Bewertung	44
3.2 Expertensysteme	47
3.2.1 US-amerikanische Vereisungssysteme	48
3.2.2 Französisches Vereisungssystem <i>SIGMA</i>	49
3.2.3 Schwedisches Vereisungsprodukt	49
3.2.4 Das Nowcastingsystem <i>ADWICE</i>	50

4	Weiterentwicklung von ADWICE	52
4.1	Das Lokal-Modell des Deutschen Wetterdienstes	55
4.2	Bodenwettermeldungen SYNOP und METAR	57
4.3	Europäisches Radarkomposit	60
4.4	Der Prognosealgorithmus ADWICE PIA	61
4.4.1	Vereisungsszenario <i>freezing</i> - Prognose	63
4.4.2	Vereisungsszenario <i>stratiform</i> - Prognose	64
4.4.3	Vereisungsszenario <i>convective</i> - Prognose	66
4.4.4	Vereisungsszenario <i>general</i> - Prognose	66
4.5	Der Diagnosealgorithmus ADWICE DIA	67
4.5.1	Vereisungsszenario <i>freezing</i> - Diagnose	70
4.5.2	Vereisungsszenario <i>stratiform</i> - Diagnose	71
4.5.3	Vereisungsszenario <i>convective</i> - Diagnose	72
4.5.4	Vereisungsszenario <i>general</i> - Diagnose	73
4.5.5	Wolkenbedeckung und Wolkenuntergrenze	73
4.6	Bestimmung eines Vereisungsgrades	73
5	Evaluierung anhand von Fallstudien	76
5.1	Wetterlage vom 19.11.2001 - Vereisungsgefahr durch unterkühlten Niesel	77
5.1.1	Standardprodukte des DWD's	79
5.1.2	Evaluierung von ADWICE V2	80
5.1.3	Gegenüberstellung von ADWICE V2 mit ADWICE V1 und den Standardprodukten des DWD's	84
5.2	Wetterlage vom 21.10.2002 - Vereisungsgefahr durch unterkühlten Regen	86
5.2.1	Standardprodukte des DWD's	88
5.2.2	Evaluierung von ADWICE V2	89
5.2.3	Gegenüberstellung von ADWICE V2 mit ADWICE V1 und den Standardprodukten des DWD's	92
5.3	Wetterlage vom 27.05.2002 - Vereisungsgefahr in hochreichender Konvek- tionsbewölkung	95
5.3.1	Standardprodukte des DWD's	96
5.3.2	Evaluierung von ADWICE V2	98
5.3.3	Gegenüberstellung von ADWICE V2 mit ADWICE V1 und den Standardprodukten des DWD's	102
5.4	Zusammenfassung und Bewertung	104
6	Diskussion	107
7	Ausblick	110
	Literaturverzeichnis	113
	Danksagung	118
	Lebenslauf	119