

Berichte des Deutschen Wetterdienstes

**241**

# **Messphysik und Datenverarbeitung der Verkehrsflugzeuge als meteorologische Sensorträger**

von Axel Hoff, Clemens Drüe und Hans-Rudi Sonnabend





Berichte des Deutschen Wetterdienstes

**241**

**Messphysik und Datenverarbeitung  
der Verkehrsflugzeuge  
als meteorologische Sensorträger**

von Axel Hoff, Clemens Drüe und Hans-Rudi Sonnabend

**Zitationsvorschlag:**

Axel Hoff, Clemens Drüe und Hans-Rudi Sonnabend (Hrsg.: Deutscher Wetterdienst): Messphysik und Datenverarbeitung der Verkehrsflugzeuge als meteorologische Sensorträger. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2013. (Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 241)

---

ISSN der Online-Ausgabe: 2194-5969

ISSN der Druckausgabe: 0072-4130

ISBN 978-3-88148-468-8

---

**Nutzungsbedingungen:**

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz:



Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden. Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Die in den DWD-Berichten veröffentlichten Texte werden allein von ihren jeweiligen Autoren verantwortet; die darin zum Ausdruck gebrachte Meinung entspricht nicht notwendig der Meinung des Herausgebers (Deutscher Wetterdienst).

---

**Herausgeber und Verlag:**

Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach am Main  
bibliothek@dwd.de  
www.dwd.de

**Anschrift der Autoren:**

Dr. Axel Hoff  
Deutscher Wetterdienst  
Abt. Messnetze und Daten  
Frankfurter Str. 135  
63067 Offenbach/Main  
Axel.Hoff@dwd.de

Hans-Rudi Sonnabend  
Lufthansa Systems AG  
Meteorological Services  
Am Prime Parc 2  
65479 Raunheim  
hans-rudi.sonnabend@  
lhsystems.com

Dr. Clemens Drüe  
Universität Trier  
Fachbereich VI - Geogra-  
phie/Geowissenschaften  
Umweltmeteorologie  
54286 Trier  
druee@uni-trier.de

## **Vorwort**

Seit mehr als 20 Jahren werden die synoptischen Atmosphärenmessungen durch die standardmäßig vorhandene Sensorik und die nachrichtentechnische Infrastruktur der Verkehrsflugzeuge beträchtlich erweitert. Der Gewinn an Informationen über den Zustand der Atmosphäre kommt nicht alleine der Verwertung in der Luftfahrt zugute sondern bewirkt generell in der numerischen Wettervorhersage eine hochgradige Leistungssteigerung. Die Flugzeuge sind für die Meteorologie sehr willkommene Messplattformen. Auf der Basis einer schon recht großen Anzahl von Verträgen zwischen Wetterdiensten und Fluggesellschaften beziehungsweise Funknetzbetreibern sind diverse Flotten oder zumindest große Teile davon programmtechnisch konfiguriert und teilweise auch schon mit zusätzlicher Feuchtesensorik nachgerüstet. Alle diese nachträglichen Anpassungsvorgänge sind aber für neu aufgelegte Baureihen oder Nachfolgetypen der Flugzeuge wieder neu zu erstellen. Nur so bleibt die ergiebige meteorologische Messdatenversorgung durch die Flotte erhalten. Die Verträge zwischen Wetterdiensten und Luftfahrtpartnern sind entsprechend fortzuschreiben, zu pflegen und zu erweitern. Die meteorologische Nutzung der Flugzeuge ist zur Zeit noch keine Selbstverständlichkeit. Das atmosphärenmesstechnische Potential der Flugzeuge wird sich, auch im eigenen Interesse der Luftfahrt, zu einem weltweit bindenden Standard entwickeln müssen.

Der folgende Bericht gibt einen etwas detaillierteren Einblick in die Messverfahren und deren Infrastruktur. Ein Exzerpt dieses Berichtes wird im Rahmen des Themas Flugmeteorologie in der Fortbildungszeitschrift „Promet“ erscheinen.



## **Zusammenfassung**

Die physikalischen und nachrichtentechnischen Aspekte der auf Verkehrsflugzeugen gewonnenen meteorologischen Messungen werden erläutert. Das Beispiel des arbeitsteiligen europäischen Flugzeugmesssystems dient zur Erklärung der Kosten und der Optimierung des Messumfanges. Darüber hinaus werden weitere flugzeugbasierte Systeme vorgestellt. Ein besonderer Teil befasst sich mit den Verfahren und Strategien der Messfehleranalyse bis hin zu den Studien, die sich mit der Wirkung des mengenmäßig großen Messdatenangebotes auf die Qualität der numerischen Vorhersagemodelle befassen. Im Ausblick wird die Perspektive auf eine weltweit standardmäßige meteorologische Funktionalität aller Verkehrsflugzeugflotten eröffnet.

## **Summary**

### **Measuring Technique and Data Management of Commercial Aircraft Fleets as Meteorological Observing Platforms**

The physical and telecommunications part of the meteorological measurements based on commercial aircraft fleets is discussed. The example of the European aircraft measurement system serves to explain the costs and subsequent optimization of the data volume. In addition, other aircraft-based systems are presented. A special section deals with the methods and strategies of error analysis as well as with impact studies for numerical forecast models. Finally, a perspective view is opened to a world standard meteorological functionality of all commercial aircraft.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Motivation und Geschichte</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Die wetterdienstlich genutzten, flugzeugbasierten meteorologischen Beobachtungssysteme</b> .....	<b>9</b>
2.1 AMDAR .....	9
2.1.1 Messphysik .....	9
2.1.2 Dateninfrastruktur auf flugbetrieblicher Seite .....	18
2.1.3 Das Beispiel des europäischen AMDAR-Gesamtsystems .....	21
2.1.4 Kosten .....	27
2.2 ADS-B/-C .....	27
2.3 Mode-S-Radar .....	28
2.4 TAMDAR .....	28
2.4.1 Messphysik .....	28
2.4.2 Dateninfrastruktur und Kosten .....	29
<b>3 Bestimmung und Korrektur von Messfehlern</b> .....	<b>31</b>
3.1 Eigenschaften des Messfehlers .....	31
3.2 Mittlere Abweichungen .....	31
3.3 Systematische Abhängigkeiten .....	32
3.4 Impaktstudien .....	33
<b>4 Perspektiven des weltweiten Ausbaus der Luftfahrt für die meteorologische Datenerfassung einschließlich des Wasserdampfes</b> .....	<b>35</b>
4.1 Nachträgliche Flugzeuganpassungen .....	35
4.2 Werkseitige Vorbereitung von Flugzeugbaureihen .....	36
4.3 Integration von AMDAR in die Konzepte der Luftfahrtsystemtechnik kommender Generationen .....	36
4.3.1 Vereisungswarnung .....	37
4.3.2 Ökonomische Aspekte bei der Steuerung des Enteisungsprozesses .....	37
4.3.3 Kondensstreifen .....	37
<b>5 Fazit</b> .....	<b>39</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>40</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>42</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>43</b>

## 1 Motivation und Geschichte

In den 1970er Jahren wurde ein auf Verkehrsflugzeuge gesondert installierbares System erprobt, das nur meteorologische Messdaten der standardmäßigen Flugzeuginstrumentierung für Druck, Temperatur und Wind über geostationäre Satelliten an die Wetterdienste meldete. Es trug den Namen ASDAR (Aircraft to Satellite Data Relay). Ein großer Antennenbehälter wurde am vorderen Fußteil des Seitenleitwerks von Verkehrsflugzeugen montiert. ASDAR war die erste in die Tat umgesetzte Idee, Verkehrsflugzeuge als unmittelbar meldende meteorologische Beobachtungssysteme zu verwenden.

Im Lauf der neunziger Jahre ging die Nutzung des ASDAR zurück. Parallel in den 1970er Jahren wurde ein weltweites digitales Datenfunksystem für den Flugverkehr aufgebaut, das den vor allem über Ballungsgebieten überfrachteten Sprechfunk systematisch entlasten sollte: ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System). Eine Fluggesellschaft, die ihre Flotte mit diesem System ausstatten ließ, bekam damit eine effiziente Übersicht über Ort und Betriebszustand aller Flugzeuge. Weltweit verteilt gibt es Sendempfangsanlagen (englisch: „Radio Ground Stations“ oder „Transceiver Stations“), die zumindest über Land den nahezu permanenten Datenaustausch ermöglichen. Je nach Ausrüstungs- und Konfigurationszustand der Flugzeuge werden die Daten gegebenenfalls auch über den teureren Satellitenweg, wie zum Beispiel „Inmarsat“, übertragen. Die Funknetzbetreiber sind die Firmen ARINC (Aeronautical Radio Inc., USA) oder SITA (Société Internationale de Télécommunication Aéronautique, Europe).

Eine kleine Untermenge der von den Flugzeugen an ihre Betriebszentrale übertragenen Daten sind atmosphärenphysikalische Parameter, die luftfahrtstandardmäßig gemessen werden, weil sie für die Flugführung unverzichtbar sind:

- die Flughöhe, über die Standardatmosphäre (ISA) abgeleitet aus dem Umgebungsdruck,
- die sogenannte statische Temperatur (ungestörte Umgebungstemperatur),
- der Windvektor in Form von Geschwindigkeit und Richtung.

Diese meteorologische Informationsquelle wurde ab den späten achtziger Jahren in den USA für die NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) nutzbar gemacht. Unter dem Akronym MDCRS (Meteorological Data Collection and Reporting Service) wurde der ACARS-Kommunikationsprozess so konfiguriert, dass für jede Flugphase in geeigneten Abtastraten (zum Beispiel 10 Sekunden bei Start, 10 Minuten im Reiseflug, 1 Minute bei Landeanflug) meteorologische Messungen erfolgen und diese Daten von dem Funknetzbetreiber ARINC unmittelbar an die NOAA-Institute abgezweigt werden. Ab den neunziger Jahren kamen die Regionen Europa, Australien/Neuseeland, Südafrika, Hongkong, Japan und auch China mit ähnlichen Konzepten der Nutzung der bordeigenen Mess- und Kommunikationssysteme dazu.

Damit entstand weltweit neben einer ergiebigen Überdeckung mit Streckenmessdaten in der oberen Troposphäre zusätzlich zu den existierenden Radiosondenmessungen eine Vielzahl von Vertikalprofilen, gebietsweise in hoher zeitlicher und räumlicher Dichte. Deren besonderer Nutzeffekt erwuchs mit der unabhängig parallel einhergehenden Steigerung der räumlichen Auflösung der numerischen Atmosphärenmodelle für die Wettervorhersage.

Diese Steigerung der prinzipiell verfügbaren Messungen aus der freien Atmosphäre durch die Hereinnahme der Flugzeugmessungen ist vergleichsweise preiswert. Der finanzielle Aufwand für Datenerfassungs- und Datenverarbeitungsprogramme an Bord der Flugzeuge und für die Dateninfrastruktur am Boden verteilt sich auf sehr viele Vertikal- und Streckenprofile. Von den Feuchtemessungen zunächst noch abgesehen, betragen die Messdatenkosten wenige Prozent derer von Radiosonden. Der Aufwand der grundlegenden Qualitätssicherung, also die Systemwartung, liegt auf der flugbetrieblichen Seite, da die Einhaltung der Messgenauigkeit zulassungskritisch für den Betrieb der Flugzeuge selbst ist.

Als Name für diese meteorologische Nutzung von Luftfahrtkommunikationstechnik wird weltweit das Akronym AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) verwendet. Die Grundfunktionalität der Messstrategie basiert auf den luftfahrtstandardmäßig immer in gleicher Weise auf den Flugzeugen vorhandenen Sensoren

und Avionik-Komponenten (Avionik = elektronische Navigations-, Steuerungs- und Nachrichtensystemtechnik auf Flugzeugen).

Eine annähernd gleichwertige Ergänzung von Radiosondenaufstiegen durch Flugzeugmessungen kann aber nur dann erfolgen, wenn die Flugzeuge auch in der Lage sind, die Luftfeuchte zu messen. Diese Instrumentierung ist rein flugbetrieblich bislang nicht erforderlich. Somit muss ein für die kommerzielle Luftfahrt akzeptables Sensorsystem in die Flugzeuge integriert werden. Durch die NOAA wurden ab 2004 bereits 25 Flugzeuge eines Frachtflugbetriebes und seit 2009 sukzessive Passagierflugzeuge einer Verkehrsfluggesellschaft mit Feuchtesensoren ausgestattet. Der europäische Verbund der Wetterdienste (EIG EUMETNET) hat ab 2007 die ersten 3 Flugzeuge seiner Flotte mit Feuchtesensoren bestückt.

Im Rahmen der WMO (**World Meteorological Organisation**) wurde 1998 auf der Basis eines Trust Fund ein gesondertes in seiner personellen Besetzung offenes Panel eingerichtet, das eine koordinierende und standardisierende Funktion ausübt. Neben dem AMDAR-Reference Manual (PAINTING 2003) wurde auch der entsprechende Abschnitt im CIMO-Guide (WMO Nr. 8, Teil II, Kapitel 3) zu einer weltweiten Richtlinie. Ebenfalls unter dem WMO-Schirm entstanden die Normen für die meteorologische Programmierung der Prozessoreinheiten, die ACARS an Bord der Flugzeuge betreiben (siehe auch Kapitel 2.1.2).

Neben AMDAR haben sich weitere funknetzbasierte Systeme gebildet, die Atmosphärendaten von Verkehrsflugzeugen den Wetterdiensten anbieten. Das System **TAMDAR (Tropospheric Airborne Meteorological Data Reporting)** ist ein eigenes gesondert auf dem Flugzeug zu montierendes Modul an Sensoren inklusive einer Feuchte- und Vereisungsmessung. Es steht in Verbindung mit den Datenbussen des Flugzeugs, um über die Navigationsdaten auch die Windinformation ableiten zu können. Die Messergebnisse gehen über das **IRIDIUM-Satellitennetzwerk** an die Zentrale des Systembetreibers. Wetterdienste können die On-line-Zustellung der Daten über Exklusivverträge käuflich erwerben.

Seit 2006 werden alle Verkehrsflugzeuge mit ADS-B- oder ADS-C-Transpondern ausgestattet (ADS: „**Automatic Dependent Surveillance**“). Sie senden hauptsächlich Positions- und Bewegungsdaten für Flugsicherungszwecke. Eine Untermenge der gesendeten Daten sind auch wieder die Meteorologischen.

Ein anderes Transpondersystem basiert auf Radar: Mode S. Auch hier wird ein Teil der meteorologisch relevanten Daten übermittelt. Alle Flugzeuge mit geeigneten Transpondern im Abdeckungsfeld eines Flugüberwachungsradars liefern permanent neben den Positions- und Bewegungsdaten auch Atmosphärendaten. Seit 2004 ist diese Ausstattung für alle Flüge nach Instrumentenflugregeln obligatorisch.

Neben den für wetterdienstliche Routinemessaufgaben konfigurierten Flugzeugen gibt es auch einzelne Verkehrsflugzeuge des Typs Airbus A340, die in gesondertem Auftrag wissenschaftlicher Atmosphärenmessprojekte als Messplattformen genutzt werden:

- **MOZAIC (Measurements of OZone, water vapour, carbon monoxide and nitrogen oxides by in-service Airbus airCRAFT)** fokussierte auf die Auswirkungen der anthropogenen Spurengase auf die Chemie der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre. Dieses Projekt wurde abgelöst durch
- **IAGOS (In-service Aircraft for a Global Observing System)** zur Beobachtung von Spurengasen, Aerosol und Wolkenpartikeln.
- **CARIBIC (Civil Aircraft for the Regular Investigation of the atmosphere Based on an Instrument Container)** ist die Nutzung des zu einem Messlabor umgebauten Gepäckcontainers, der entsprechend wissenschaftlicher Fragestellungen gezielt konfiguriert auf den Passagierflügen eingesetzt wird.

## 2 Die wetterdienstlich genutzten flugzeugbasierten meteorologischen Beobachtungssysteme

### 2.1 AMDAR

#### 2.1.1 Messphysik

An Bord jedes Verkehrsflugzeuges werden in hoher Abtastrate (1 - 10 Hz) sowohl thermo- und aerodynamische als auch flugdynamische Messgrößen erfasst und den bordeigenen Datenbussen verfügbar gemacht. Unter anderem sind es die folgenden Parameter:

- Umgebungsdruck (Rohwert)  $p_{si}$  an den in Abb. 1 gezeigten Statik-Druckmessöffnungen (Indizes: s = „static“, i = indicated)
- Auftreffdruck oder Gesamtdruck (Rohwert)  $q_{ci}$  an den in Abb. 1 gezeigten Pitot-Rohren (Indizes: c = entspricht Luftfahrtnorm, i = indicated)
- Gesamttemperatur (Rohwert)  $T_{ti}$  aus den in Abb. 1 gezeigten Temperaturmessvorrichtungen (Indizes: t = total, i = indicated)
- Steuerkurs aus dem Navigationssystem
- Flugzeuggeschwindigkeitsvektor über Grund  $\vec{V}_K$  aus dem Navigationssystem (Index: K = entspricht Luftfahrtnorm, Bezug auf geodätisches Koordinatensystem)
- Position aus dem Navigationssystem
- Vereisung aus speziellem Sensor

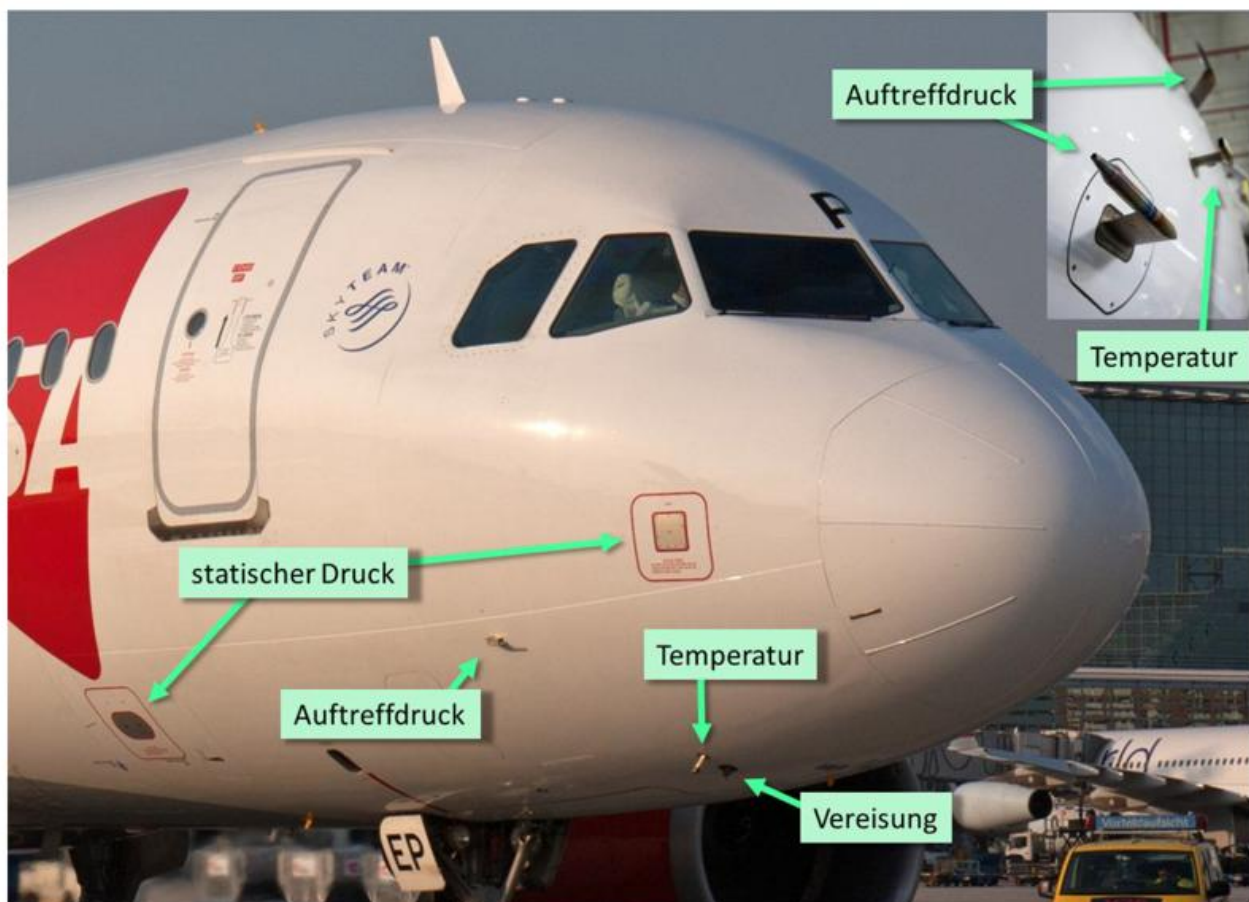


Abb. 1: Die Messpositionen für statischen Druck, Auftreffdruck, Temperatur und Vereisung an einem Airbus A319 (Copyright: Björn Schmitt). Oben rechts ist die Nahaufnahme des Pitotrohrs (Auftreffdruck) und des TAT-Gehäuses (Temperatur) auf der Backbordseite eines Embraer-Flugzeugtyps (Quelle: Lufthansa AG).

Diese Rohmessgrößen werden benötigt, um an Bord in einer mehrstufigen Echtzeitprozedur die für die Meteorologie verwendbaren Werte zu erhalten:

- |   |       |
|---|-------|
| (1) Umgebungsdruck (statischer Druck)   | $p_s$ |
| Index: $s$ = static, entspricht Luftfahrtnorm<br>bzw. geopotentielle Druckhöhe nach ISA (oder ICAO) | $H_p$ |
| Index: $p$ = entspricht Luftfahrtnorm   |       |
| (2) Umgebungstemperatur (sog. statische Temperatur)   | $T_s$ |
| Index: $s$ = static, entspricht Luftfahrtnorm   |       |
| (3) Windgeschwindigkeit   | FF    |
| Windrichtung  | DD    |

Die Größen (1) bis (3) sind aus rein flugbetrieblichen Gründen standardmäßig auf jedem Verkehrsflugzeug verfügbar.

Damit diese Messsystemträger als gleichwertige Ergänzung oder sogar als teilweiser Ersatz von Radiosonden fungieren können, ist es erforderlich, auch eine Messgröße für die

- (4) Luftfeuchte  
zu erfassen. Auf weltweit mehr als 70 Maschinen wird das bereits heute (2013) praktiziert.

Zukünftig sollen die Flugzeuge zudem

- (5) Turbulenzparameter  
messen. Dieses wird bereits in Prototypenausfertigungen auf Delta Airlines, Southwest Airlines, United Airlines, American Airlines und zum Teil Air France erprobt.

Darüber hinaus wird der

- (6) Höhenmesswert des Satellitennavigationssystems  
verfügbar, auf dessen Basis es möglich sein wird, die geopotentielle Höhe jeder meteorologischen Flugzeugmessung abzuleiten.

Die Erweiterung des Bordprogramms, auf deren Basis die GPS-Höhe verfügbar wird, schaltet auch den Zugriff auf das Signal des Sensors frei, der eine für die Flugsicherheit kritische Eigenschaft misst:

- (7) Vereisung.

Von Seiten der Umweltschutzeinrichtungen besteht das Interesse an der Einbeziehung von

- (8) luftchemischen Instrumenten und Partikelsensorik.  
Die Partikelsensorik ist auch durch die Vulkanascheproblematik im Rahmen des Flugverkehrs von besonderem Interesse der Fluggesellschaften.

### (1) Der Umgebungsdruck und die geopotentielle Druckhöhe

Eine auf jedem Flugzeug elementar wichtige physikalische Messgröße ist der statische Druck. Unter Nutzung der ICAO-Standardatmosphäre wird diese Größe in der Luftfahrt letztendlich als die Höhenmessung verwendet. Die Vorgaben von RVSM (Reduced Vertical Separation Minima) verlangen seit dem Jahr 2000 eine Verkleinerung der vertikalen Abstände der Flugverkehrsniveaus von 2 000 ft auf 1 000 ft für den Höhenbereich zwischen 30 000 ft und 40 000 ft. Die Konsequenzen liegen unter anderem in der Erfordernis einer Druckmessgenauigkeit von etwa  $\pm 1$  hPa, ähnlich derer meteorologischer Radiosonden. Die Messöffnungen für den statischen Druck, die sogenannten Statik-Ports befinden sich in der Regel einige Meter hinter der Flugzeugnase, beidseitig schräg nach unten am Zylinderförmigen Teil des Rumpfes. Ein dritter Statik-Port befindet sich bei der Typfamilie Airbus A320 deutlich weiter vorne. Dort befindet sich eine weitere Stelle an der die aerodynamisch bedingte Abweichung vom ungestörten Umgebungsdruck ausreichend klein ist. Trotz der für die jeweilige Form des Flugzeugbaumusters über Zulassungsflugversuche optimierten Position der Statik-Ports müssen in den Prozeduren des bordeigenen Air-Data-Computer (Algorithmus) die restlichen auftreffdruck- und anstellwinkel- bzw. gewichtsbedingten Abweichungen des Rohmesswertes vom ungestörten Umgebungsdruck noch herausgerechnet werden. Das Endprodukt dieses Prozesses hat die oben genannte Genauigkeit und trägt dann erst den Namen „statischer Druck“.

Die geopotentielle Druckhöhe wird an Bord anhand der internationalen Standardatmosphäre berechnet und geht in die Datenübertragung an den Boden:

$$\text{für } p_s > 226,32 \text{ hPa: } H_p = 145442 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_s}{1013,25} \right)^{0,19026} \right]$$

$$\text{für } p_s < 226,32 \text{ hPa: } H_p = \ln \left( \frac{p_s}{226,32} \right) \cdot 20.806 + 36.089$$

mit  $p_s$  in hPa und  $H_p$  in ft.

## (2) Die Umgebungstemperatur

Würde ein Temperaturfühlerelement am Flugzeug direkt in die umströmende Luft gehalten, dann gäbe es einen undefinierten Mischeffekt aus den lokalen stau- und dilatationsbedingten adiabatischen Temperaturabweichungen. Bei einer Fluggeschwindigkeit von gut 250 m/s (Mach 0,85 in 10 km Höhe) bewirkt im Staupunkt eines Gegenstandes die Umwandlung von kinetischer Energie in innere Energie eine Temperaturerhöhung um fast 30 K auf den Wert der Gesamttemperatur  $T_t$ . Deswegen wird in der Messvorrichtung auf dem Flugzeug dafür gesorgt, dass um das Fühlererelement herum ein weitestgehend rein adiabatischer Stauereffekt entsteht, der sich mithilfe des über das Pitot-Rohr gemessenen Auftreffdruckes und des statischen Druckes berechnen lässt. Die ungestörte Umgebungstemperatur (statische Temperatur  $T_s$ ) ist dann:

$$T_s = T_t \left( \frac{p_s}{p_{si} + q_{ci}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

mit  $\kappa = c_p / c_v$  Quotient der spezifischen Wärmekapazitäten von Luft,  
 $T$  als Symbol für absolute Temperaturen.

In der Abb. 2 ist ein typisches Exemplar dieser Messvorrichtung gezeigt. Es handelt sich um ein sogenanntes Gesamttemperaturmessgehäuse, das auf dem Flugzeugrumpf montiert ist. In Anlehnung an die englische Bezeichnung „Total Air Temperature Housing“ wird anstelle „Gesamttemperatur“ das Kürzel TAT verwendet. Die Eintrittsöffnung des TAT-Gehäuses ist etwa 8 cm über der Flugzeugoberfläche. Der Eintrittspunkt muss jenseits der Reibungsschicht liegen, damit gewährleistet ist, dass die komplette kinetische Energie des Gases für den rein adiabatischen Entstehungsprozess der zu messenden Gesamttemperatur verfügbar ist, und sich keine unberechenbaren diabatischen Effekte mit einmischen. An dem üblichen Einbauort im vorderen Teil des Flugzeugrumpfes (innerhalb von etwa 5 m hinter der Flugzeugnase) ist die Dicke dieser Grenzschicht bei nur wenigen cm. Hinter der Eintrittsöffnung wird die Messluft in ein Staurohr geleitet, das die Geschwindigkeit auf einen Restwert von etwa 5 - 10 m/s reduziert. Zugleich wird durch die Absaugung der Grenzschicht an den Innenwänden deren Wärmeaustauschprozess mit dem Messluftstrom von dem zu nutzenden Kernteil der Strömung ferngehalten. Die Wirkung der aus Flugsicherheitsgründen erforderlichen Enteisungsheizung des Luftesintrittes auf die Temperatur des Messluftstroms wird klein gehalten. Der verbleibende Resteffekt ist je nach Gehäusotyp unterschiedlich abhängig von der Mach-Zahl und der Luftdichte. Bei den normalen Geschwindigkeiten der Verkehrsflugzeuge beläuft sich dieser Fehler auf 0,2 bis 0,5 K. Die gezielt eingerichtete Krümmung des Luftstroms vor dem Eintritt in die eigentliche Messtülle dient der Absonderung größerer Partikel, die dem Sensorelement schaden würden.

Die verbleibende Geschwindigkeit der Messluft und damit der Restwert für die korrekte Gesamttemperatur  $T_t$  wird über den sogenannten Recovery-Faktor, einem gehäusetypeigenen Beiwert berücksichtigt. Die typspezifischen Korrekturen für die TAT-Gehäuse des Herstellers Rosemount bzw. Goodrich (Dachkonzern) sind in STICKNEY et al. (1994) zu finden. Sie liegen bei unter 0,5 % des  $T_t$ -Wertes, also unter 1,5 K. Erfahrungsgemäß sind die Messfehlerursachen meistens zu finden in

- Schädigung des Messfühlerelementes,
- Effekt der Gehäuseheizung bei niedrigen Geschwindigkeiten (unterer Teil des Landeanfluges),
- Einbauort des TAT-Gehäuses an einer Stelle mit zu dicker Grenzschicht (extrem selten).

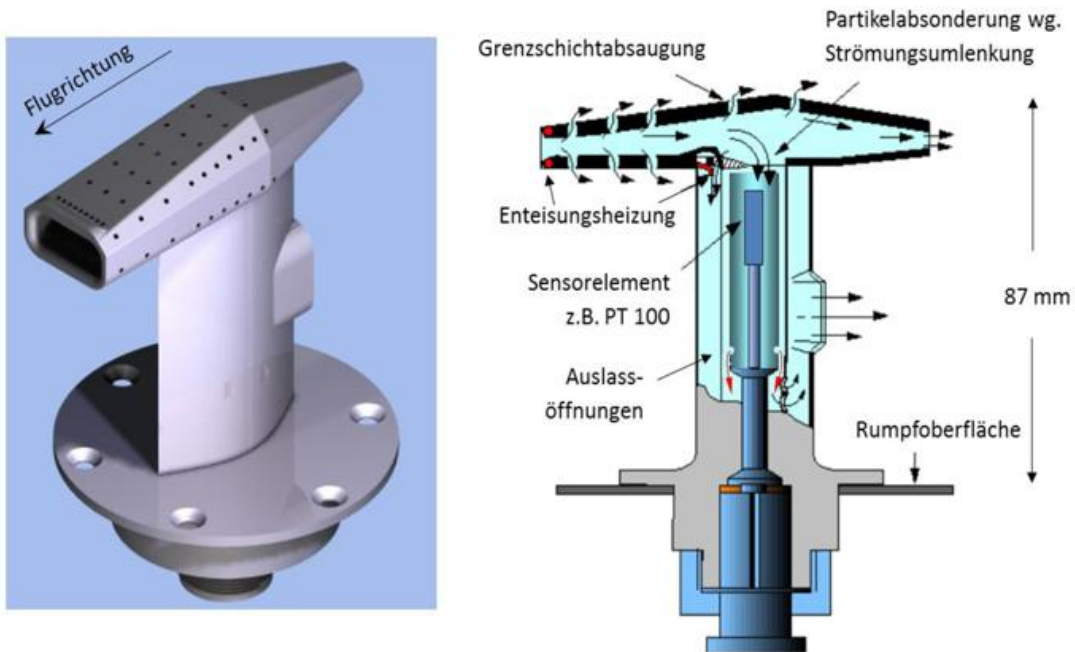


Abb. 2: Die Messung der Außentemperatur am Flugzeug erfolgt in einem speziell aerodynamisch geformten Gehäuse, dem Gesamttemperaturmessgehäuse, das in Anlehnung an den englischen Sprachgebrauch „TAT-Gehäuse“ genannt wird (Total Air Temperature Housing). Abbildung basierend auf Darstellungen der Gehäusetypenreihe Rosemount 102 B (Quelle: Forschungszentrum Jülich, Goodrich Corporation).

### (3) Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Der Windvektor ergibt sich entsprechend Abb. 3 aus der Differenz zweier großer Geschwindigkeitsvektoren

$$\vec{V}_w = \vec{V}_k - \vec{V}$$

- mit  $\vec{V}_k$  = Geschwindigkeit des Flugzeuges über Grund (Groundspeed, GS),  
 und  $\vec{V}$  = Geschwindigkeit des Flugzeuges durch das Medium, Fluggeschwindigkeit (True Airspeed, TAS)

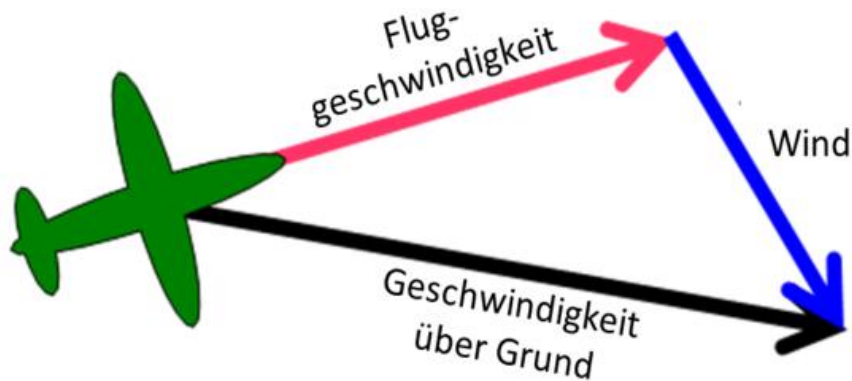


Abb. 3: Winddreieck: Der Vektor der Fluggeschwindigkeit ist normalerweise parallel zur Längsachse des Flugzeuges. Über die Addition des Windvektors ergibt sich die Bewegung über Grund.

Die Richtung der Bewegung des Flugzeuges durch das Medium Luft ist der vom Navigationssystem gemessene Steuerkurs, auch „True Heading“ genannt. Der Betrag des Vektors, die Fluggeschwindigkeit, trägt im internationalen Sprachgebrauch das Akronym TAS (True Airspeed). Dieser Wert wird aus dem Auftreffdruck, dem statischen Druck und der Gesamttemperatur berechnet

$$TAS = \sqrt{2 c_p T_t \left[ 1 - \left( \frac{p_s}{p_{si} + q_{ci}} \right)^{\frac{R}{c_p}} \right]}$$

mit  $c_p$  = spezifische Wärme von Luft bei konstantem Druck  
 und  $R$  = spezifische Gaskonstante von Luft

Die Bewegung des Flugzeuges über Grund (international auch Groundspeed, GS), also in Bezug auf das geodätische Koordinatensystem, wird dem Navigationssystem entnommen, das zumeist aus der Kombination von Trägheitsnavigationssystem und Satellitennavigation besteht.

Der Wind als vektorielle Differenz aus  $\vec{V}_K$  und  $\vec{V}$  wird anschließend in einen Betrag und in eine Richtung bezüglich des geodätischen Nordens umgerechnet.

Die möglichen Fehlerursachen für die bordeigene Windmessung sind

- Fehler in TAS wegen
  - Temperaturfehler,
  - Restfehler in der aerodynamischen Korrektur des statischen Druckes,
  - Drucksensorfehler (extrem selten),
- Fehler im Steuerkurs wegen
  - starkem Rollwinkel und dem damit sich auswirkenden Anstellwinkel,
  - restlicher Kompensationsfehler im Steuerkurs aus dem Magnetkompass, wenn der Steuerkurs aus einer Trägheitsnavigation nicht verfügbar ist,
  - Drifteffekte im ggf. nicht durch GPS gestützten Trägheitsnavigationssystem,
  - Schiebeflug durch unzureichende Trimmung des Flugzeugs,
- Fehler im Geschwindigkeitsvektor über Grund wegen
  - Drifteffekte im ggf. nicht durch GPS gestützten Trägheitsnavigationssystem,
  - Ausfall des GPS-Empfangs.

Die durch einen starken Rollwinkel resultierenden Windmessfehler in AMDAR sind identifizierbar durch Indikationsgrößen, die parallel zu den Meldungen ausgegeben werden. Statistiken der letzten Jahre ergeben, dass die Windmessfehler von AMDAR sich im Durchschnitt nicht von denen der Radiosonden unterscheiden (zum Beispiel in KLEINERT 2011). Für die Punkte (1) bis (3) siehe auch VÖRSMANN et al. (1989).

#### (4) Luftfeuchte

Es existieren zahlreiche Feuchtemessverfahren, auch solche, die auf wissenschaftlichen Messflugzeugen verwendet werden. Aber nur extrem wenige Verfahren haben eine derartige Standfestigkeit, den Messbetrieb auf Flugzeugen durchzustehen, die innerhalb der Zeitspanne von etwa zwei Jahren jeden Tag wenigstens 10 Stunden die Atmosphäre mit bis zu 4 oder 6 Zyklen zwischen 1000 und 200 hPa mit Geschwindigkeiten bis zu Mach 0,85 durchqueren. Die Zeitspanne von zwei Jahren ist der Abstand zwischen den sogenannten C-Checks. Nur zu diesen Wartungsereignissen werden am Flugzeug die Zugangswege zu den Einbauten so freigelegt, dass gegebenenfalls ein Austausch des Sensors problemlos erfolgen kann. Nahezu alle Messverfahren benötigen normalerweise in kurzen Abständen Wartungseingriffe und Nachkalibrationen. Ein grundsätzlich standfestes Prinzip stellen die optischen Verfahren dar, also die von der Wasserdampfdichte abhängige Absorption oder Streuung von elektromagnetischer Strahlung bestimmter Wellenlängen. Ein Absolutverfahren, das eine einzige Wellenlänge verwendet, wäre aber noch extrem abhängig von sich permanent verändernden Verschmutzungen an den Außenflächen der Optik, die mit dem eigentlich zu messenden Me-

dium in Kontakt kommen. Das einzige von diesem Problem weniger beeinträchtigte physikalische Prinzip ist das Relativverfahren, das sich auf zwei oder mehrere Wellenlängen stützt, die innerhalb und außerhalb der Absorptionsbande der zu messenden Gasbeimengung liegen. Im Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena, Kalifornien wurde ein Verfahren entwickelt, das auf einem abstimmbaren Dioden-Laser (TDL, Tunable Diode Laser) basiert (MAY UND WEBSTER 1993). Wenn eine Gasbeimengung, wie in diesem Fall der Wasserdampf, Absorptionsbanden separat von denen der trockenen Gasmischung Luft hat, dann sind diese für ein Absorptions- oder Streuungsmessverfahren geeignet. Das System WVSS-II des Herstellers Spectra-Sensors Inc. wendet das Verfahren des JPL für eine Absorptionsbande bei 1,37  $\mu\text{m}$  (Infrarot) an. Periodisch durchfährt der TDL die Wellenlängen im Bereich dieser Bande. Der damit entstehende zeitliche Verlauf des Absorptionssignals wird durch ein in der Firmware abgelegtes numerisches Verfahren zusammen mit der lokalen Druck- und Temperaturmessung in den Parameter des Wasserdampf-Massenmischungsverhältnisses umgerechnet, der als Ausgangsgröße zur Verfügung steht. Das Signalanalyseverfahren benötigt eine herstellenseitige Kalibration individuell für jedes Sensorexemplar. Für einen konstanten Betrieb über mehr als 2 Jahre ohne Drifteffekte braucht es eine hohe Standfestigkeit aller mechanischen und elektronischen Bauteile des Systems.

In der Abb. 4 ist der Aufbau des Systems skizziert. Der Laser-Strahl wird am Ende der 12 cm langen Messkammer gespiegelt und durchläuft die Luftsäule damit zwei Mal. Lokal innerhalb der Messkammer werden sowohl Temperatur als auch Druck gemessen. Das derzeitige Ein- und Auslaufprinzip für die Messluft besteht aus einer auf der Außenhaut des Flugzeugrumpfes montierten Durchlaufvorrichtung, dem sogenannten „Air Sampler“. Durch die flache Auslegung dieser Vorrichtung ist der mögliche Ansatz von Eis auf der Außenkante ausreichend klein, dass eine elektrische Enteisungsbeheizung nicht erforderlich wird und sich damit der luftfahrtmäßige Zulassungsprozess für den Flugzeugeinbau in engeren Grenzen hält.

Die Abzweigung und Wiedertzuleitung des Messluftstromes ist aerodynamisch so ausgelegt, dass der Druck in dem zu durchlaufenden Messsystem etwa beim Außendruck liegt. Die Nähe des internen Betriebsdruckes zum Umgebungsdruck kann aber bei hoher relativer Feuchte zu einem ungewollten Kondensations- oder Sublimationsprozess innerhalb des Messgasstromes führen. Also werden der Zulaufschlauch und viel mehr noch die Kammer, in der der Absorptionsprozess des Lasers stattfindet, so beheizt, dass in ihr die Temperatur deutlich oberhalb des weltweit höchstmöglichen Taupunktes gehalten wird (etwa 35 °C). Auf dem wissenschaftlichen Messflugzeug des Typs BAe 146 der FAAM (Facility for Airborne Atmospheric Measurements) wird im Auftrag von EIG EUMETNET derzeit (2013) ein Lufteinlauf erprobt, der eine adiabatische Erwärmung der Messluft bewirkt, so dass eine elektrische Beheizung der Messkammer unnötig wird.

Der Aufwand der Integration der Feuchtesensoren in das Gesamtsystem AMDAR beschränkt sich nicht nur auf den Flugzeugeinbau und die zugehörige luftfahrtmäßige Zertifizierung, sondern es müssen auch alle Bestandteile der Datenübermittlung bis zu den Wetterdiensten an die zusätzliche Messgröße angepasst werden. Im Jahr 2012 wurde die Norm ARINC 620 angeglichen, die die Datenübertragung vom Flugzeug zum Boden beschreibt (siehe Kapitel 2.1.2). Neben diversen anderen Änderungen und Neuerungen wurde auch die digitale Auflösung des Wasserdampfmassenmischungsverhältnisses in einer Gleitkommazahl mit bislang dezimal zweistelliger Mantisse auf vier Stellen erhöht. Dieser Parameter lässt sich auf der Basis des statischen Druckes und der Temperatur wieder in alle anderen Feuchtegrößen umrechnen.

Der europäische Verbund der Wetterdienste EIG EUMETNET hat bislang 3 Lufthansa-Flugzeuge des Typs Airbus A 319 mit diesen Sensoren bestückt. In Abb. 5 ist das Beispiel des Vertikalprofils eines mit Feuchtesensor ausgestatteten Flugzeuges gezeigt. Im Auftrag von EIG EUMETNET kommen in der Lufthansa-Flotte in 2013 weitere 6 mit Feuchtesensoren bestückte Flugzeuge hinzu.

In der MDCRS-Flotte der NOAA werden Ende 2013 mehr als 100 Flugzeuge (UPS, Southwest Airlines) mit den beschriebenen Sensoren ausgestattet sein. Derzeit (Februar 2013) sind etwas mehr als 70 Flugzeuge bestückt. Die Abb. 6 zeigt die Überdeckung der USA mit Feuchtemessungen genau dieses Sensortyps.

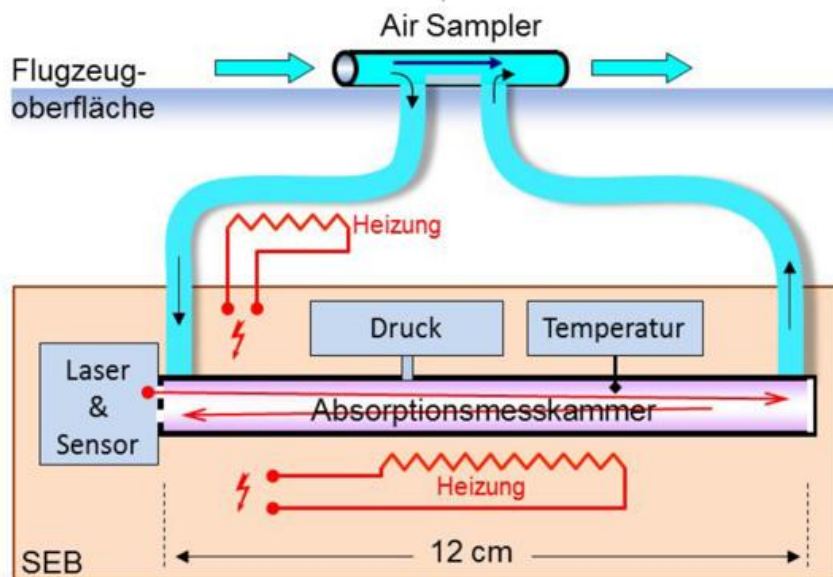
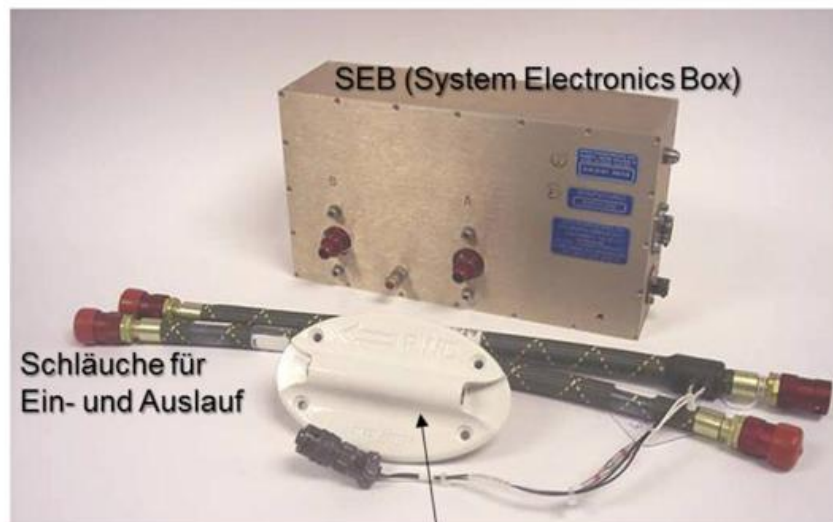


Abb. 4: Der Aufbau des in AMDAR verwendeten Feuchtemesssystems von SpectraSensors Inc., USA, Typ WVSS-II (Quelle: SpectraSensors). Der untere Teil der Abbildung gibt das Funktionsschema (Quelle: DWD) wieder. Die fotografische Abbildung oben zeigt die in das Flugzeug einzurüstenden Komponenten. Das Kabel ist für die Beheizung des Zulaufschlauches.

Die Leistungsfähigkeit der neuesten Generation des Systems wurde und wird in Laborversuchen und Flugmesskampagnen erprobt. Unter anderem wurde der Sensor beim DWD in der Klimakammer des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg getestet (HOFF 2009). Die Ergebnisse zeigen, dass zumindest unter Bodendruckbedingungen noch Wasserdampfmassenmischungsverhältnisse bis hinunter zu 0,003 g/kg messbar sind. Die Flugversuchsreihen im Rahmen von DENCHAR (Development and Evaluation of Novel Compact Hygrometer for Airborne Research) und auf dem Forschungsflugzeug der FAAM sind im Gange und deuten darauf hin, dass die Klimakammerergebnisse sich bestätigen (VANCE ET AL. 2011). Vergleiche zwischen den in den USA auf den Verkehrsflugzeugen installierten Sensoren und gezielt an gleichem Ort und zu gleicher Zeit gestarteten Radiosonden zeigen ermutigende Ergebnisse (PETERSEN ET AL. 2011).

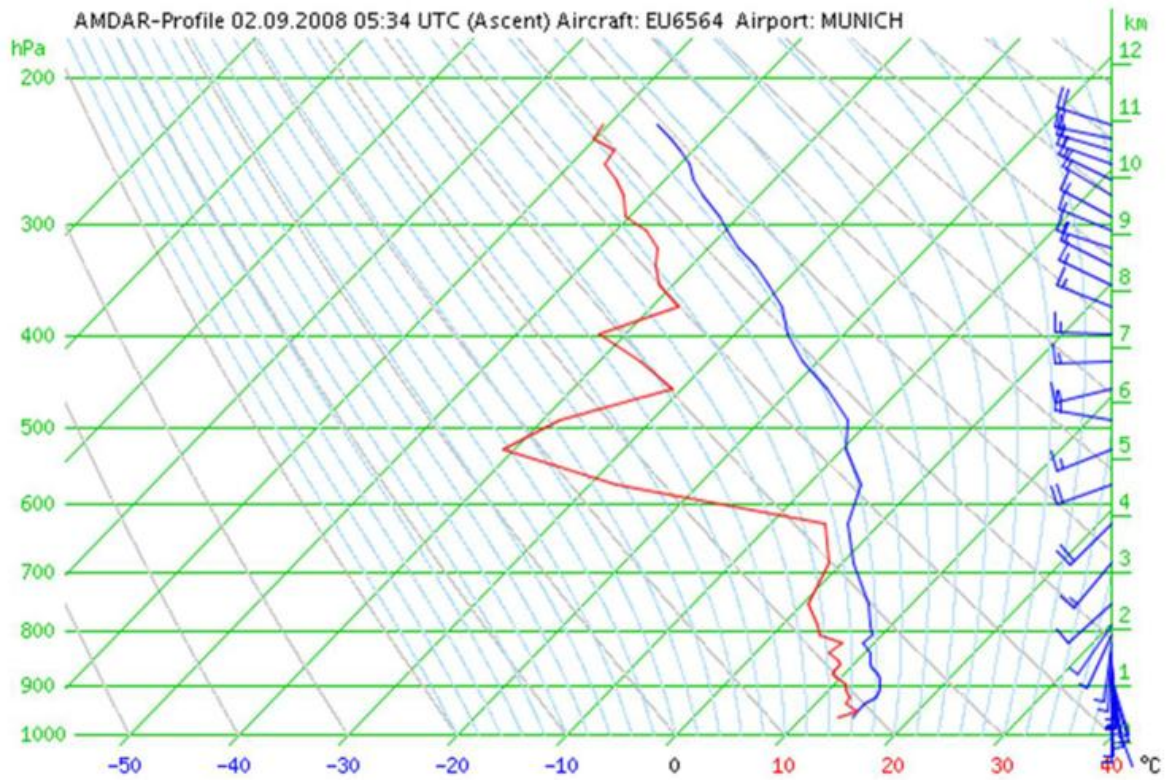


Abb. 5: Beispiel des Vertikalprofils (T-logP-Diagramm) eines mit Feuchtesensor ausgestatteten Flugzeuges der Luft-hansa-Flotte. Blaue Linie: Trockentemperatur, rote Linie: Taupunkt, rechte Skala: Hodogramm.

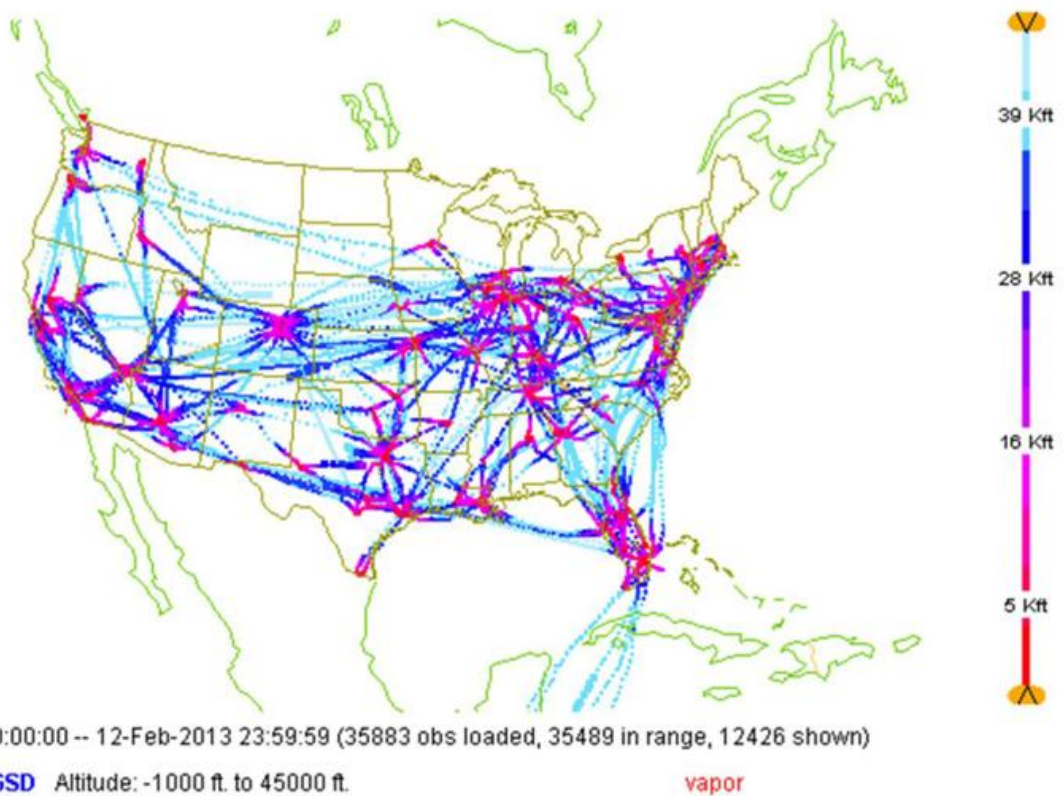


Abb. 6: Verteilung der Feuchtemessungen von mehr als 70 Flugzeugen im Lauf von 24 Stunden über den USA. Die Messhöhen sind an der Färbung der Punkte erkennbar (siehe Legende rechts).

## (5) Turbulenzparameter

Das Grundprinzip der Turbulenzmessung der Verkehrsflugzeuge basiert nicht auf einer direkten Windmessung. Es sind die Auswirkungen der Strömungsfluktuationen auf die vertikale Komponente der Beschleunigungsmessung im Trägheitsnavigationssystem. Unter Hinzunahme

- der oben schon beschriebenen Luftdaten (Drücke und Temperatur),
- der aktuellen Flugzeugmasse
- und der aerodynamischen Flugzeugkenngrößen

lässt sich die EDR (Eddy-Dissipation-Rate) berechnen. Eine andere Methode bedient sich anstelle der Vertikalbeschleunigungen der Fluktuationen der Fluggeschwindigkeit, um aber letztendlich auch wieder auf den Wert der EDR zu kommen. Allen Turbulenzberechnungsverfahren, die auf den standardmäßig auf Verkehrsflugzeugen verfügbaren Messgrößen basieren, ist gemeinsam, dass es noch große Abhängigkeiten von der Leistungsfähigkeit der Avionik gibt, die je nach Fluggesellschaft und nach Flugzeugtypen unterschiedlich sein kann.

Derzeit sind unterschiedliche Turbulenzmessalgorithmen auf verschiedenen Flugzeugtypen von Delta Airlines, Southwest Airlines, United Airlines und American Airlines für Testzwecke installiert. Qualitätskontrollstrategien werden erprobt. Das bisherige Datenübertragungsprinzip zwischen Flugzeug und Boden wird in der Hinsicht zu überarbeiten sein, dass es neben den regelmäßigen (Heartbeat) auch ereignisgebundene Übertragungen gibt, die prioritär gegenüber den Abschaltungen durch Optimiersysteme (siehe Kapitel 2.1.2) laufen. Nur so ließe sich der besondere Nutzen im Nowcasting für die Luftfahrt verwirklichen.

Unter der Regie der FAA (US-amerikanische Luftfahrtbehörde) ist im Rahmen des Vorhabens „Next Generation Air Transportation System“ (NextGEN = Pendant zu SESAR, Single European Sky ATM Research) ein Projekt im Gange, das die Vereinheitlichung der Gütekriterien, der Übertragungsstrategie und der Kodierung des Parameters EDR in AMDAR bringen soll. Diese Standardisierung ist erforderlich, einerseits für eine nachhaltige Programmierung der Avionik und andererseits für die Verwendbarkeit in numerischen Modellen der Wettervorhersage.

## (6) Höhenmesswert des Satellitennavigationssystems

In aller Regel haben die Verkehrsflugzeuge der heutigen Generation auch Satellitennavigationsempfänger, wie zum Beispiel GPS, als eine Komponente ihres Navigationssystems. Vornehmlich werden für den Navigationsprozess die horizontalen Komponenten der Ortslösung genutzt. Es kann aber auch der vertikale Teil der Ortsbestimmung verfügbar sein. GPS gibt einen Höhenwert bezüglich des WGS 84-Koordinatensystems der Erde heraus. Dieser Wert lässt sich zunächst in das Referenzsystem umrechnen, das dem jeweiligen numerischen Wettervorhersagemodell zugrunde liegt. Darüber hinaus muss der Wert noch der örtlichen Gravitationsabweichung von dem für die Meteorologen gültigen Standardwert angepasst werden. Dieses Verfahren sollte identisch sein zu denen, die bereits für die Nutzung der Höhenwerte von GPS-gestützten Radiosonden angewendet werden.

Mit der oben genannten Erneuerung der Datenübertragungsnorm ARINC 620 ist die Voraussetzung gegeben, über ACARS an die Rohgröße des GPS-Höhenparameters in einer Auflösung von 10 ft (3 m) zu gelangen.

Mit der dann verfügbaren geopotentiellen Höhe können alle Druck-, Temperatur-, Feuchte- und Windwerte von AMDAR gekoppelt werden. Alle Streckenflugdaten erhalten von AMDAR erstmals das zugehörige Geopotential. Zudem entfallen die eventuellen Restfehler in dem Höhenintegrationsprozess für die Start- oder Landungsprofile.

## (7) Vereisung

An einigen Verkehrsflugzeugen ist ein gesonderter Detektor für den Vereisungsprozess eingebaut. Er erlaubt eine Messung des Auftretens von Vereisung, nicht aber deren Intensität. Die Information des Cockpits über die Bildung von Eis an allen Frontflächen des Flugzeugs ist von großer Bedeutung für die Flugsicherheit.

Es gibt verschiedene Messprinzipien. Eines der zuverlässigsten ist ein quer zur Strömung ausgerichteter Stab, der über eine elektromechanische Anregung permanent in Schwingung gehalten wird. Eisansatz verändert die Eigenfrequenz des Stabes, und damit wird ein Alarmsignal im Cockpit erzeugt.

Das Signal des Eisdetektors ist auch auf den Datenbussen der Avionik, die über ACARS gelesen werden können und damit für AMDAR zur Verfügung stehen. Die ARINC-620-Version des Jahres 2012 sieht diese Anbindung vor.

#### (8) Luftchemische Instrumente und Partikelsensorik

Im Rahmen des Projektes IAGOS sollen mehrere Flugzeuge europäischer Fluggesellschaften einen Satz an Instrumenten sowohl für verschiedene chemische Luftbeimengungen ( $O_3$ , CO,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $NO_x$ ,  $NO_y$ ,  $H_2O$ ) als auch für Aerosol und Wolkenpartikel aufnehmen. Der Echtzeit-Datentransfer geht aber nicht über ACARS sondern über eine separate Satellitenverbindung zur Netzzentrale von ARINC, von wo die Daten einen Teil der AMDAR-Infrastruktur von EIG EUMETNET nutzen.

Die Chemie- und Partikelsensorik ist derzeit noch in einem Stadium der Forschung und Entwicklung und von daher noch kein Standardinstrumentarium. Es ist denkbar, dass die derzeit in Planung befindlichen Nachfolgesysteme von ACARS die Aufgabe der Messdatenübertragung übernehmen werden.

#### 2.1.2 Dateninfrastruktur auf flugbetrieblicher Seite

Die Bereitschaft von Fluggesellschaften zur Teilnahme an AMDAR ist nicht ganz uneigennützig. Auch wenn die meteorologischen Beobachtungsdaten der Flugzeuge nur bedingt direkt genutzt werden können, so erwarten die Fluggesellschaften durch die vermehrten Beobachtungsdaten eine deutliche Verbesserung der Vorhersagen im Flugwetterdienst. Besonderes Interesse liegt hierbei in den Wind- und Temperaturvorhersagen in der Atmosphäre bis Flugfläche 530 (etwa 16 000 m), welche direkt in eine genauere Flugwegplanung und Treibstoffberechnung pro Flug Eingang finden.

Die weltweit betriebenen AMDAR-Systeme, mit ihren regionalen Schwerpunkten in Nordamerika, Europa, Ostasien, Australien, sind in ihrer technischen Grundstruktur nahezu identisch. Sie unterscheiden sich nur in den verwendeten Software-Modulen im Flugzeug oder in der Art der Datenübermittlung vom Flugzeug an die Wetterdienste.

#### Auf dem Flugzeug

Alle modernen Verkehrsflugzeuge sind in der Regel mit ACARS ausgestattet, welches eine schnelle und zuverlässige Übertragung von Nachrichten von und zum Flugzeug ermöglicht. Die Verbindung wird entweder über eine feste Bodenstation (Radio-Ground-Station) oder in Gebieten ohne eine solche Station auch über Satellit hergestellt. Dabei wird automatisch immer die kostengünstigste Verbindungsart und, wenn mehrere Netzbetreiber zur Verfügung stehen, auch der preiswerteste Anbieter ausgewählt. Alle Nachrichten werden vor dem Versand verschlüsselt, so dass sie von keinem Unbefugten gelesen werden können. Dies gilt sowohl für die AMDAR-Reports als auch für die Trigger-Meldungen zum Flugzeug.

Abb. 7 gibt einen schematischen Überblick über das Zusammenwirken von ACARS und AMDAR sowie die verschiedenen Kommunikationswege.

Um ein Flugzeug AMDAR-fähig zu machen, wird eine spezielle Software im Flugzeug benötigt. Dieses Programm ist in der Regel in der ACARS MU (Management Unit) implementiert und muss an den jeweiligen Flugzeugtyp angepasst werden. Es hat die Aufgabe, aus den vom Flugzeug bereitgestellten Daten gemäß den Anforderungen einen AMDAR-Report zu erstellen und zu verschicken.

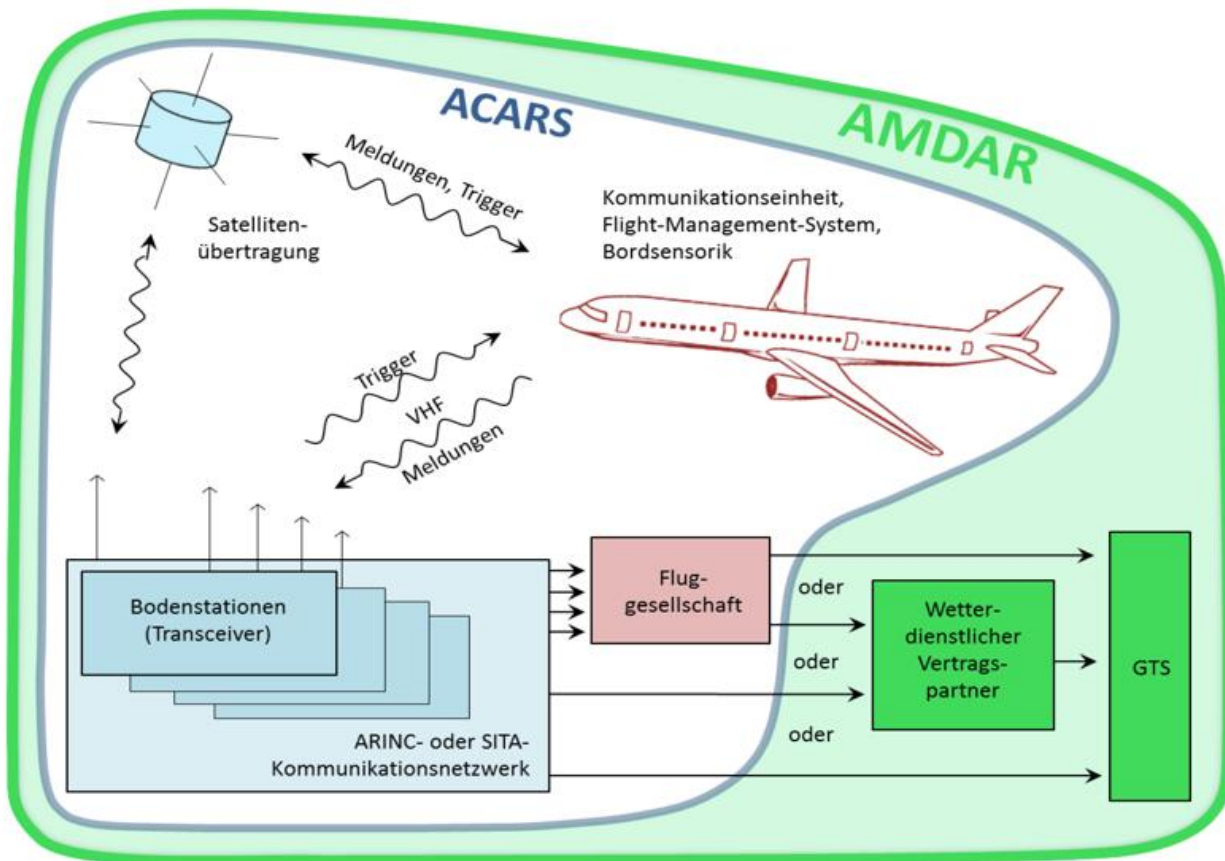


Abb. 7: AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) auf der Basis des Bord-Boden-Kommunikationssystems ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System).

Generell können über ACARS nur Nachrichten mit dem ASCII-Zeichensatz verschickt werden. Dies hat den Nachteil, dass Nachrichten, welche zum Beispiel Zahlen enthalten, länger als nötig sind und daher die Kosten dafür etwas höher sind. Für AMDAR-Reports wurden Standardformate definiert. Das am häufigsten angewendete Format entspricht der Norm ARINC 620, welches mit den allermeisten Bordsystemen kompatibel ist. Eine Ausnahme bildet das ebenfalls häufig verwendete Daten-Management-System von Teledyne, welches einen eigenen Standard erfordert: AAA (ACARS ACMS AMDAR, mit ACMS = Aircraft Condition Monitoring System). Daneben gibt es noch einige lokale Datenformate, welche jedoch nicht den vollen Datenumfang haben, wie die oben genannten.

Unabhängig vom verwendeten Format-Standard werden in allen Flugzeugen die AMDAR-Reports nach demselben Prinzip erstellt. Den Ablaufplan für die gewünschten Reports erhält jedes Flugzeug individuell wenige Minuten vor dem Abflug, das heißt zwischen dem Verlassen der Parkposition und dem Abheben, dem frühesten Beginn der AMDAR-Messungen. Diese werden spätestens beim Aufsetzen auf die Landebahn beendet.

Die Abb. 8 gibt eine Übersicht über die AMDAR-Einstellungen während der verschiedenen Flugphasen.

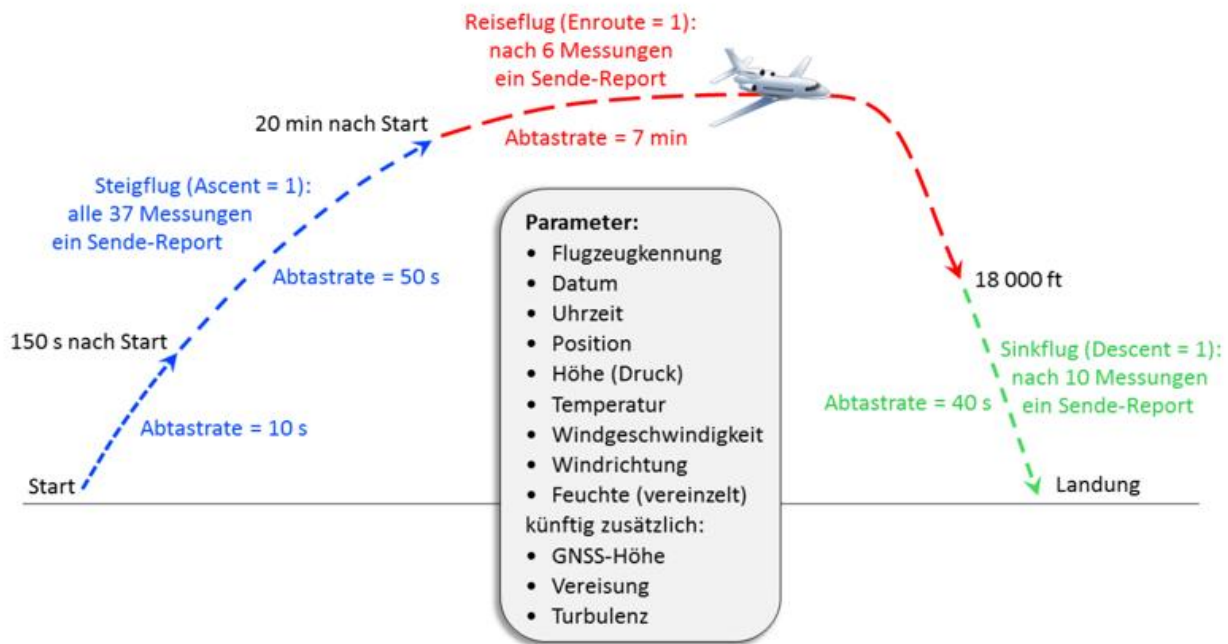


Abb. 8: AMDAR Report-Erstellung. Alle Messintervalle, Zeiten oder Höhen sind per Trigger-Meldung konfigurierbar. Die hier gezeigten Werte sind die derzeitigen (2013) Einstellungen auf der Lufthansa-Flotte.

In der Abb. 9 ist eine Übersicht über die AMDAR-Reportsteuerung innerhalb des Flugzeugs gemäß Ablaufplan dargestellt. Je nach den übermittelten Vorgaben werden die verschiedenen Phasen für die AMDAR-Datenermittlung aktiviert oder deaktiviert. Aktivierte Phasen senden nach Ablauf der vorgegebenen Zeit beim Steigflug (S2) oder bei Erreichen der maximalen Anzahl von Messungen oder beim Unterschreiten der definierten Flughöhe beim Übergang vom Reise- in den Sinkflug automatisch einen AMDAR-Report.

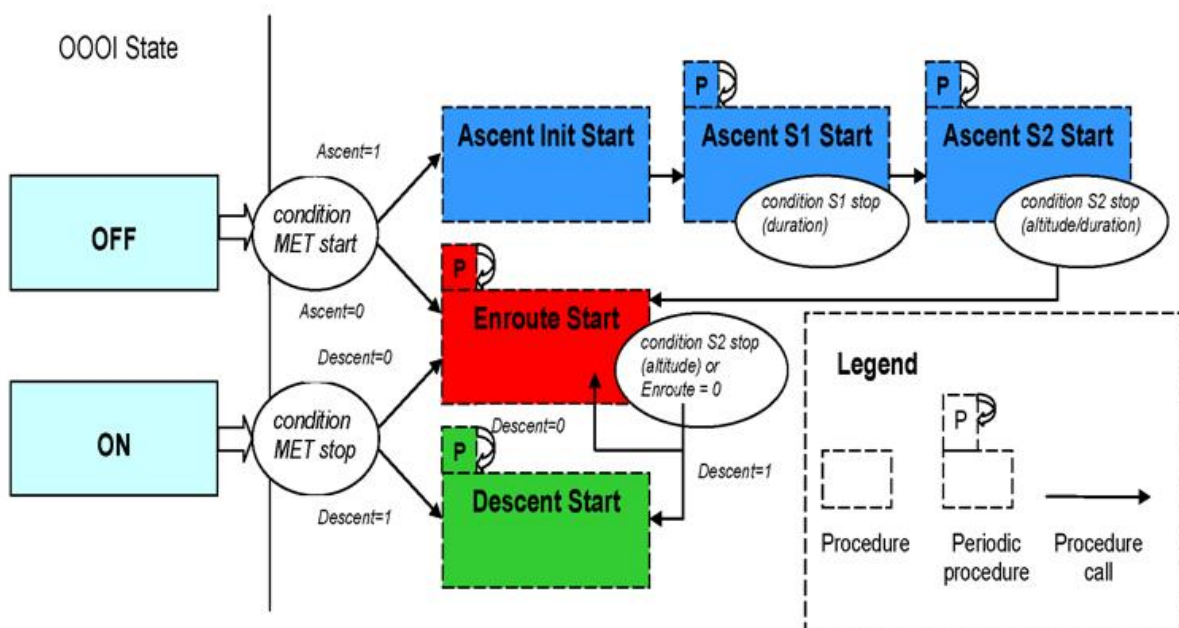


Abb. 9: AMDAR-Reportsteuerung im Flugzeug (Quelle: Lufthansa Systems Aeronautics).

## Am Boden

Sobald ein Flugzeug AMDAR-Reports erstellt hat, werden diese mittels ACARS zu dem Empfänger am Boden verschickt. Es gibt jetzt genau zwei Wege wie die Daten die Wetterdienste erreichen:

- Die AMDAR-Reports werden vom Netzbetreiber aus dem allgemeinen ACARS-Datenstrom herausgefiltert und an einen definierten Empfänger weitergeleitet. Dies ist zum Beispiel die NOAA in den USA oder zum Teil für E-ADAS bei E-AMDAR (siehe Kapitel 2.1.3).
- Der Netzbetreiber leitet die AMDAR-Reports an die Fluggesellschaft weiter. Damit hat die Fluggesellschaft weiterhin die Kontrolle über die Kommunikation und die Daten. In diesem Fall übernimmt die Fluggesellschaft eine erste Qualitätskontrolle bevor die Daten entweder in Originalform oder bereits im WMO-FM94-BUFR-Code weiter vermittelt werden.

In beiden Optionen wird aus Datenschutzgründen die Flugzeugregistrierung durch eine gesonderte Identifikation ersetzt, die keinen direkten Rückschluss auf das Flugzeugkennzeichen erlaubt.

### 2.1.3 Das Beispiel des europäischen AMDAR-Gesamtsystems

Innerhalb der europäischen wirtschaftlichen Interessengemeinschaft (Economic Interest Grouping, kurz: EIG) nationaler Wetterdienste EIG EUMETNET (EUropean METEorological Services NETwork) ist das Programm E-AMDAR (EUMETNET-AMDAR) angesiedelt. Ziel dieses Programms ist es, in Zusammenarbeit mit europäischen Fluggesellschaften meteorologische Beobachtungsdaten zu sammeln.

E-AMDAR besteht derzeit aus einer Art Arbeitsteilung zwischen den Partner-Wetterdiensten DWD, FMI, KNMI, Météo-France, SMHI und UK-Met-Office. Diese Wetterdienste sind es, die Verträge mit mittlerweile mehr als 10 Fluggesellschaften unterhalten. Die schematische Übersicht in Abb. 10 gibt einen Überblick über das gesamte E-AMDAR System und die Verantwortlichkeiten der einzelnen Partner.

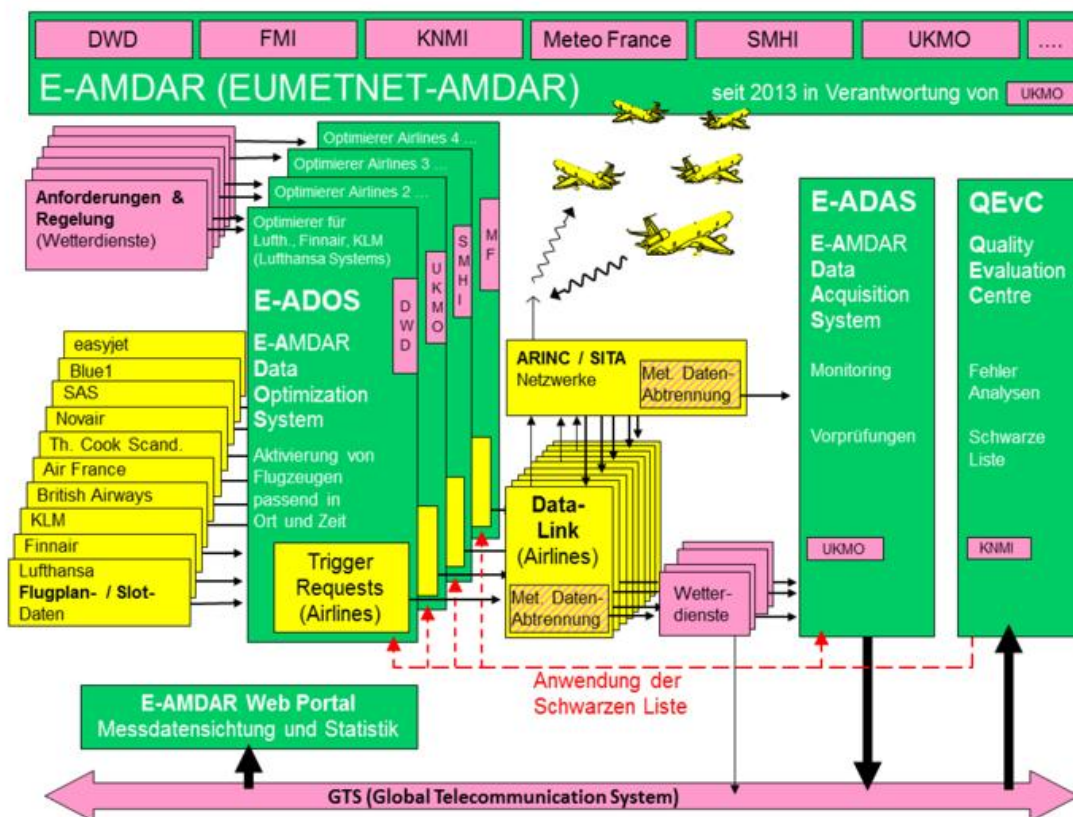


Abb. 10: Arbeitsteilung im Datenfluss von E-AMDAR. Die unmittelbaren Verantwortungsbereiche sind farblich hinterlegt: Wetterdienste (rosa), E-AMDAR (gelb), Fluggesellschaften (grün).

Die weltweit betriebenen AMDAR-Systeme sind in ihrer Struktur teils unterschiedlich. In den USA hat die NOAA in dem System MDCRS (Meteorological Data Collection and Reporting System) lediglich einen einzigen Vertragspartner, die Firma ARINC (Aeronautical Radio Incorporated). Dieser Partner regelt alle weiteren Verträge mit den mittlerweile zahlreichen Fluggesellschaften. Deren meteorologische Daten gehen über den Funknetzbetreiber ARINC an die NOAA. Bislang hängt dort der Preis für den MDCRS-Systembetrieb nicht von der bereitgestellten Datenmenge ab. Eine Optimierung hinsichtlich einer Mengengrenzung in gewissermaßen übersorgten Gebieten ist somit nicht erforderlich.

Anders ist das hingegen in Europa. Die Nutzung des Funknetzwerkes hat einen datenmengegebundenen Preis. Die E-AMDAR-weite Vorgabe ist die Profilaktivierung in einem Mindestabstand von etwa 250 km in einem Zeitraster von 3 Stunden. Einzelne Wetterdienste können auf eigene Kosten eine höhere zeitliche und räumliche Dichte der Profile vorgeben. So hat zum Beispiel der DWD die Anforderung, dass über allen deutschen Flughäfen Vertikalprofile im Ein-Stunden-Raster erstellt werden, sofern dies durch verfügbare AMDAR-Flugzeuge darstellbar ist. Innerhalb des Streckenflugs ist normalerweise ein siebenminütiger Abstand der Messpunkte von E-AMDAR festgelegt.

In aller Regel werden die Start- und Landprofile nur über den Ländern oder Ländergruppen aktiviert, zu denen die jeweilige Fluggesellschaft gehört. Über den europäischen Staaten, die bislang nicht zu den AMDAR-Betreibern gehören, werden in dem bereits verfügbaren Liniennetzwerk die Flugsegmente aktiviert, die in Zeit und Raum passende Profile bieten können. Die Starts erhalten eine erhöhte Priorität gegenüber den Landungen. Letztere werden per Definition erst bei Unterschreiten der Flugfläche 180 (etwa 5 500 m) begonnen, da sonst zu große in einer Höhe geflogene Abschnitte enthalten sein können.

Bei Aktivierung sämtlicher AMDAR-fähigen Flugzeuge ergäbe sich an verkehrsreichen Flughäfen ein Übermaß an Vertikalprofilen, das für die Nutzung in den synoptischen, numerischen und klimatologischen Anwendungen keinen zusätzlichen Gewinn brächte. Es gilt, die Zahl der Profile in Zeit und Raum auf ein durch die Wetterdienste zu spezifizierendes Maß zu begrenzen, so dass eine größtmögliche Messüberdeckung in Zeit und Raum bei minimaler Aktivierung der kostengebundenen Funkübertragung entsteht. Die Entscheidung, welches Flugzeug welche Messungen durchführen soll, wird von verschiedenen nebeneinander agierenden Optimierungssystemen getroffen. Eines dieser Systeme ist E-ADOS (E-AMDAR Data Optimization System). Es optimiert die AMDAR-Flotten der Lufthansa-Gruppe (Lufthansa Passage, Lufthansa Cargo, Lufthansa CityLine und Germanwings), Finnair sowie KLM unter Berücksichtigung aller operativen Meldungen (kurzfristige Flugplanänderungen) der Fluggesellschaften und gemäß den Anforderungen der Wetterdienste. Profil-Aktivierungen werden über die Auswahl von Flughäfen und zugeordneten Zeitrastern ermöglicht.

Unabhängig von der Flottenzugehörigkeit wird jenes Flugzeug ausgewählt, das am nächsten zu der erforderlichen Zeit an dem mit einem Profil zu belegenden Flughafen ist. Eine entsprechende Trigger-Nachricht wird zeitnah an das ausgewählte Flugzeug gesendet. Alle übrigen Flugzeuge werden über Trigger-Meldungen deaktiviert.

E-ADOS hilft, Kosten einzusparen und unnötige oder redundante Profilmessungen zu vermeiden. Neben den Grundfunktionen erlaubt E-ADOS aber auch, zielgerichtete Anforderungen (Targeted Observations) umzusetzen, um signifikante Wettersituationen besser zu erfassen. Diese Funktionalität wird aber derzeit von den europäischen Wetterdiensten noch nicht operationell genutzt. Darüber hinaus bietet E-ADOS noch eine Vielzahl weiterer Optionen. Ebenso besteht die Möglichkeit, Flugzeuge aus der E-AMDAR-Aktivierung und somit aus der AMDAR-Datenbereitstellung zu nehmen, wenn die Messungen fehlerhaft sind (Schwarze Liste).

Idealerweise wäre es von großem Nutzen, wenn nur ein einziges Optimierungssystem für alle AMDAR-Flugzeuge genutzt würde. Das wäre die bestmögliche Ausnutzung der vorhandenen Ressourcen in Raum und Zeit. Selbst beim vorübergehenden Ausfall der Daten einer Fluggesellschaft, könnten die Anforderungen der Wetterdienste an AMDAR noch erfüllt werden. Ein solches übergreifendes Optimierungssystem wäre sehr flexibel und würde automatisch auf Änderungen in Flugplänen reagieren, und die aufwendige manuelle Koordinierung der verschiedenen Systeme würde entfallen. Jede einzelne Fluggesellschaft bliebe weiterhin

selbst verantwortlich für die Kommunikation mit den Flugzeugen ihrer Flotte und behielt somit die Kontrolle. Leider haben bis heute (2013) die meisten Fluggesellschaften separate Optimiersysteme, die untereinander nicht automatisch koordiniert sind.

Die meteorologischen Meldungen der Bord-Boden-Kommunikation kommen, wie in Kapitel 2.1.2 schon beschrieben, auf unterschiedlichen Wegen an die E-AMDAR-Datenerfassungsstelle E-ADAS (E-AMDAR Data Acquisition System). Beim DWD werden die von den Lufthansa-Fluggesellschaften und von Finnair im WMO-FM94-BUFR-Code erhaltenen Daten unmittelbar weiter an E-ADAS gesendet, wo weitere Kontrollprozesse und die endgültige Einspeisung in das GTS (Global Telecommunication System) der Wetterdienste erfolgen. Nahezu ausnahmslos gehen die Messdaten aller EUMETNET-Partner vor der Eingabe in das GTS ihren Weg über E-ADAS. Innerhalb der ersten halben Stunde nach der Messung sind mehr als 90 % der Daten weltweit verfügbar.

Die unmittelbar im Anschluss stattfindende Qualitätskontrolle der Messdaten wird von dem QEvC (Quality Evaluation Centre) vorgenommen. Seit mehr als 10 Jahren wird diese Aufgabe vom niederländischen Wetterdienst KNMI wahrgenommen. Vergleiche der Einzelmessungen von AMDAR mit den Datenfeldern des numerischen Prognosemodells HIRLAM liefern Aussagen über Auffälligkeiten in den Temperatur- und Windmessungen (schwarze Liste). Regelmäßige kurzfristig verfügbare Berichte des QEvC sorgen dafür, dass auffällige Flugzeuge schnellstmöglich aus dem Meldebetrieb genommen werden. Zudem wird gegebenenfalls die Fluggesellschaft benachrichtigt, die ihrerseits ein großes Interesse an der korrekten Funktion der Sensoren hat. Zusätzlich werden seit einigen Jahren die eingehenden E-AMDAR Messdaten auch im Rahmen des zentralen Beobachtungsmonitorings des EUMETNET Observations Programms überwacht. Das Hauptaugenmerk liegt dabei in der Überwachung des Datenvolumens, der Pünktlichkeit der Meldungsbereitstellung und ebenfalls der Qualität der Daten. Letzteres wird hier durch einen Vergleich mit Kurzfristvorhersagen des globalen numerischen Vorhersagemodells des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (EZMW) realisiert.

Unter der Verantwortung von E-AMDAR steht auch ein Web-Portal für das Monitoring des Messbetriebes zur Verfügung.

Die Größe der E-AMDAR-Flotte beträgt mittlerweile mehr als 1 000 Flugzeuge (siehe auch Tab. 1). Der DWD steht mit Lufthansa unter Vertrag, die mit mehr als 350 Flugzeugen beteiligt ist. E-ADAS erhält von den europäischen Flugzeugen täglich 40 000 Einzelmessungen mit jeweils Kennung, Position, Druckhöhe, Temperatur, Wind und teilweise Feuchte. Weltweit sind etwa 4 000 Flugzeuge in AMDAR eingebunden. Diese Zahlen beziehen sich auf die technisch prinzipiell verfügbaren Flugzeuge, das heißt solche, auf denen die notwendige Software installiert ist, um Trigger-Meldungen zu empfangen und AMDAR-Meldungen abzusetzen. In Europa sind davon an jeweils einem Tag etwa 50 % an den Meldeaktivitäten akut beteiligt. Das liegt sowohl an der Optimierung als auch an Flugzeugwartungen und Parkzuständen. Über einen Monat betrachtet kommen etwa 80 % der von ihrer Konfiguration her verfügbaren Flugzeuge in E-AMDAR zum Zuge.

Insgesamt weltweit sind auf der Basis von 4.000 Flugzeugen täglich 350 000 Einzelmessungen im GTS verfügbar. Diese im Vergleich zu Europa unverhältnismäßig größere Zahl liegt an der in den USA bislang nicht erforderlichen Optimierung der Meldeaktivität der Flugzeuge.

Die flächenmäßige Überdeckung Deutschlands mit AMDAR-Messungen, die während eines Zeitraums von 24 Stunden gewonnen wurden, ist in der Abb. 11 zu erkennen. Die Flughöhe ist farblich kodiert.

Tab. 1: Die Anzahl der in 2013 für AMDAR-Betrieb verfügbaren Flugzeuge und die tägliche Umfang an Einzelmessungen aufgetrennt nach DWD, E-AMDAR und weltweit.

	Flugzeuge, messbetrieblich verfügbar	Einzelmessungen pro Tag
DWD	357	17 000
E-AMDAR	1 038	40 000
AMDAR weltweit	4 000	350 000

Eine typische 24-Stunden-Abdeckung über dem gesamten EIG EUMETNET-Gebiet ist in Abb. 12 gezeigt. Die Farbkodierung markiert die unterschiedlichen beteiligten Fluggesellschaften.

Die Messaktivitäten von E-AMDAR außerhalb des EIG EUMETNET-Bereiches (siehe Abb. 13) sind der WWW-Beitrag, der weltweit gemäß einer WMO-Vereinbarung geleistet wird, oder mit einzelnen Wetterdiensten vertraglich abgestimmt.

AMDAR erzeugt selbst über normal frequentierten Flughäfen eine zeitliche Dichte von Vertikalprofilen, die weit über das hinausgeht, was ein Netzwerk an Radiosondenstationen üblicherweise bietet (siehe Abb. 14). Für die Arbeit der beratenden Meteorologen im Flugwetterdienst sind zum Beispiel die Zeitreihen der aus AMDAR-Messungen erzeugten Hodogramme von besonderem Wert. Zeitabläufe mesoskaliger Phänomene und Strukturen lassen sich viel präziser identifizieren, als mit der Analyse der Wetterlage auf der Basis konventioneller Radiosondenmessungen, von denen es bestenfalls 4 pro Tag und Standort gibt. Ein Beispiel vom Flughafen Frankfurt gibt einen Eindruck von der Auflösung der meteorologischen Abläufe (siehe Abb. 15).

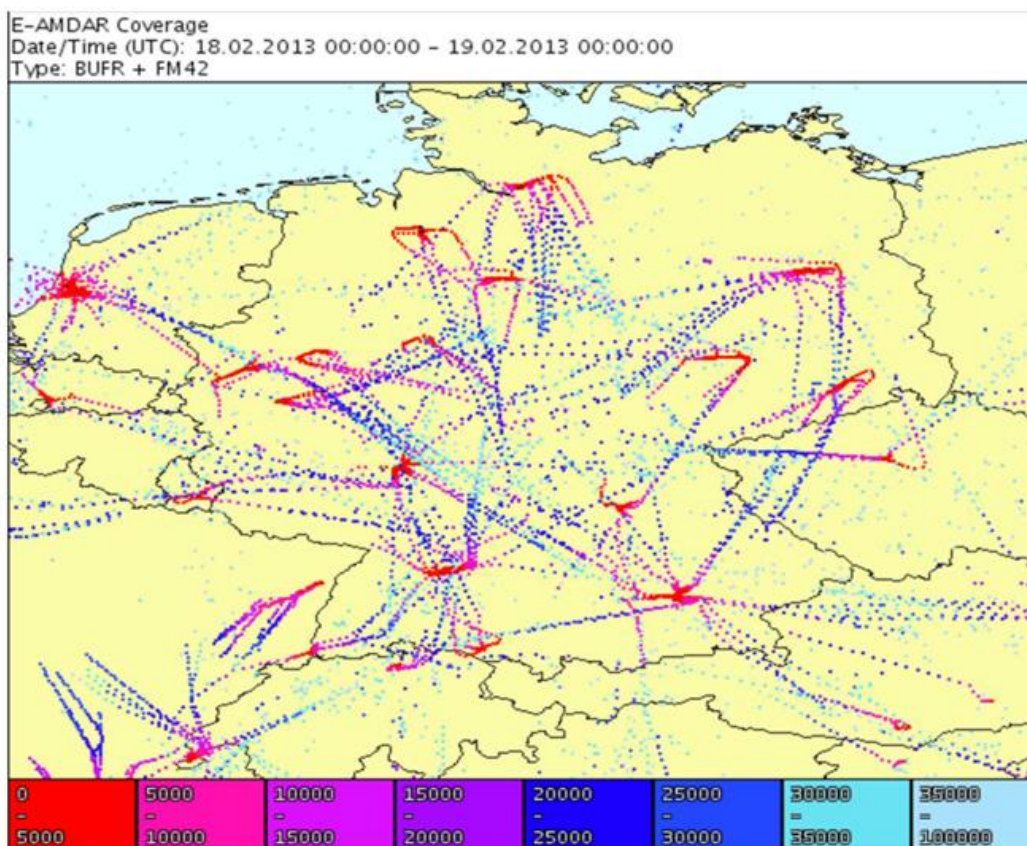


Abb. 11: E-AMDAR-Einzelmessungen eines kompletten Tages über Deutschland. Jede ist durch einen Punkt dargestellt. Die Farbe jedes Punktes zeigt die Druckhöhe der Messung an.

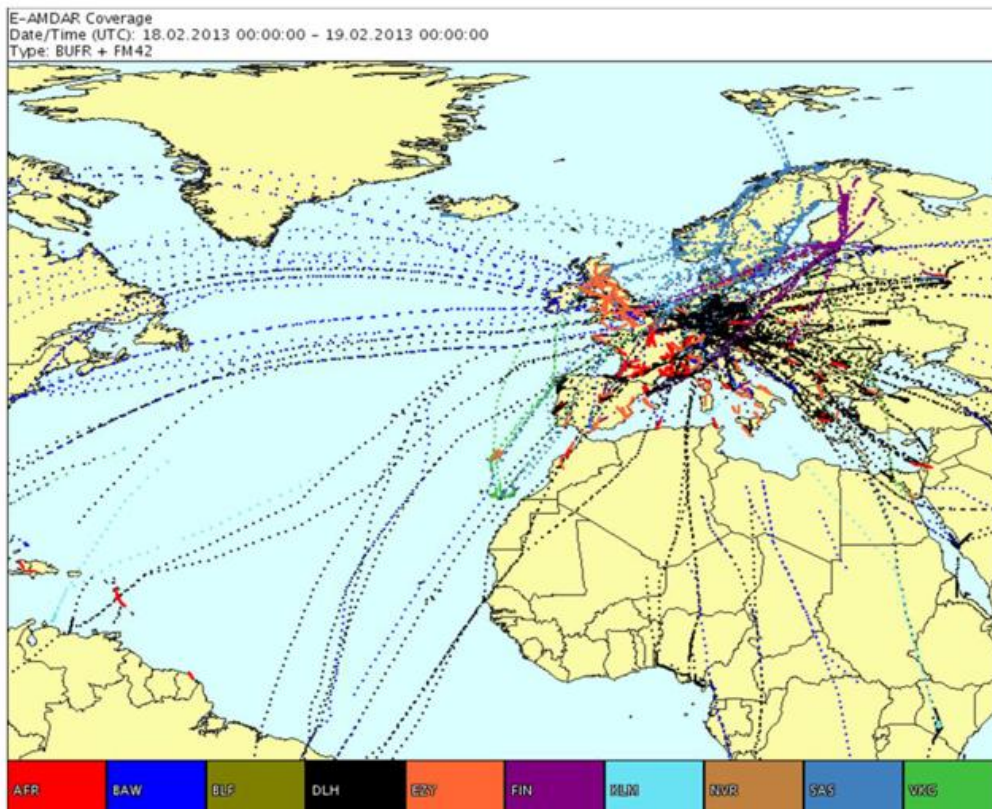


Abb. 12: 24-stündige Überdeckung des EUMETNET-Messgebietes. Die Farbkodierung bezieht sich auf die unterschiedlichen Fluggesellschaften: AFR Air France, BAW British Airways, BLF Blue 1, DLH Lufthansa, EZY easyJet, FIN Finnair, KLM Koninklijke Luchtvaart Maatschappij, NVR Novair, SAS Scandinavian Airlines, VKG Thomas Cook Scandinavia (Viking).

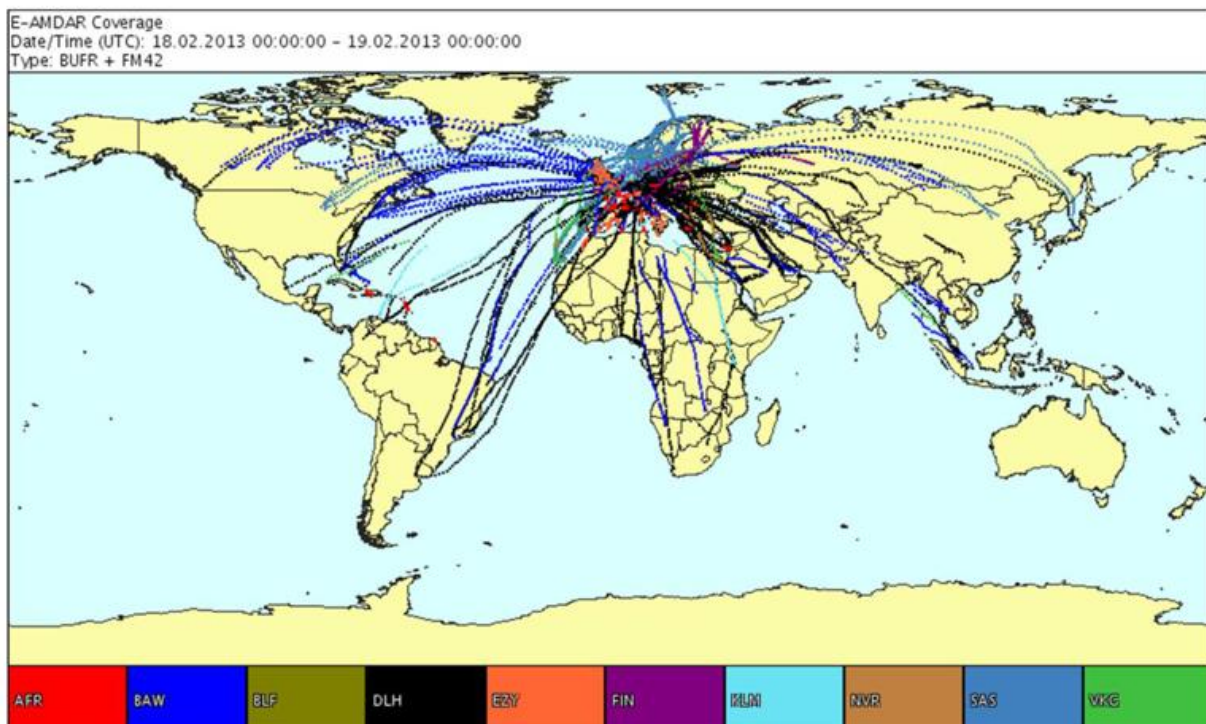


Abb. 13: 24-stündige weltweite Überdeckung des E-AMDAR-Messbetriebes. Die Farbkodierung ist wie in Abb. 12 bezogen auf die Fluggesellschaften.

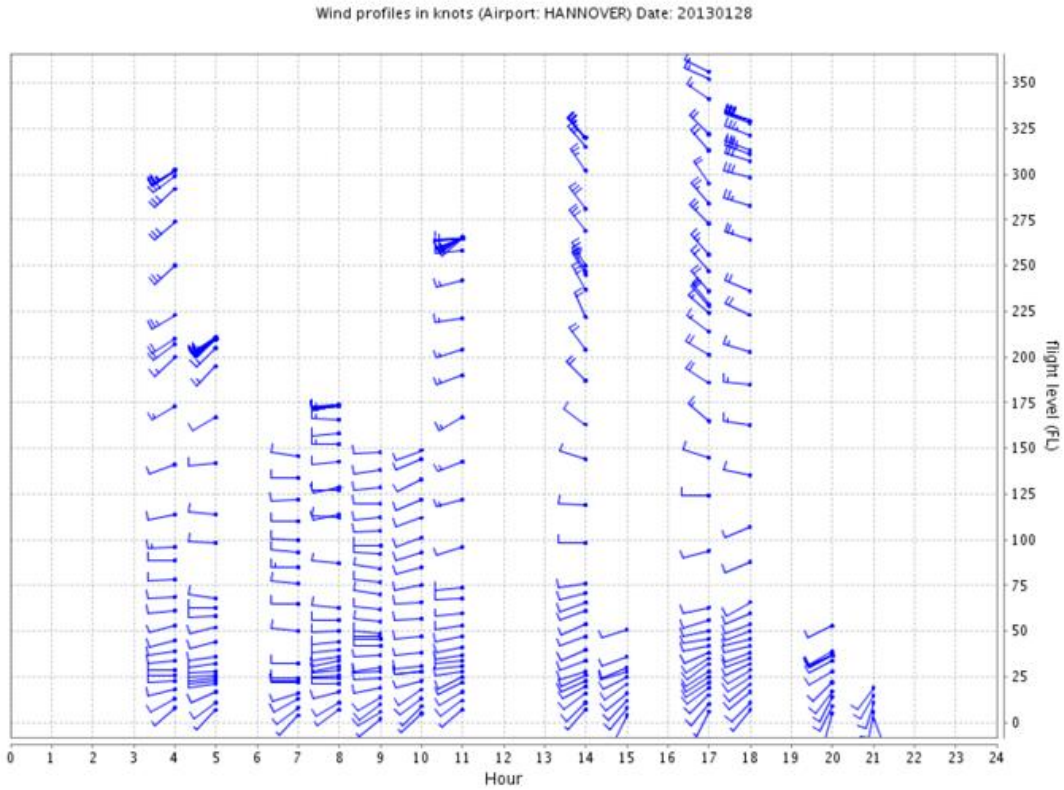


Abb. 14: Typische Zeitreihe von Hodogrammen, die an einem normal frequentierten Flughafen (Beispiel: Hannover) im Laufe eines Tages von AMDAR erzeugt wird.

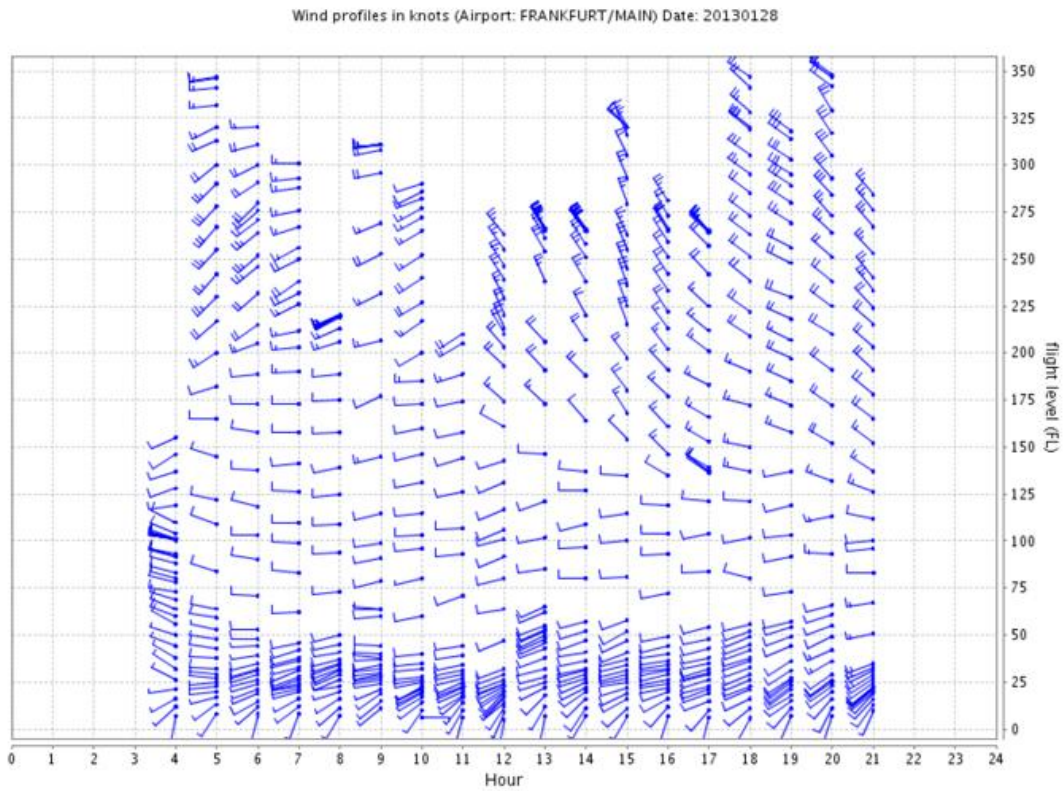


Abb. 15: 24-Stunden-Zeitreihe der AMDAR-Hodogrammen, an einem hoch frequentierten Flughafen (Beispiel: Frankfurt).

## 2.1.4 Kosten

Die Kosten der AMDAR-Messungen sind je nach Vertragslage zwischen dem jeweiligen Wetterdienst und den Fluggesellschaften unterschiedlich. Am Beispiel des Vertrages zwischen dem DWD und der Lufthansa ist es möglich, alle sowohl einmaligen als auch wiederkehrenden und datenmengengebundenen Kosten auf jedes einzelne Vertikalprofil, bestehend aus etwa 40 bis 50 Einzelmessungen, umzulegen. Für die einfache AMDAR-Konfiguration, also nur für die Datensätze, bestehend aus Flugzeugkennung, Position, Druckhöhe, Temperatur und Wind, liegt das Ergebnis bei etwa 5 €. Hier ist neben den permanent laufenden Kosten für die Funkübertragungen und den Systembetrieb auch die Umlage der Investitionen enthalten.

Die Hinzunahme der Integrations- und Betriebskosten der Feuchtemessung in ein entsprechendes Umlageverfahren verteuert das einzelne Profil um etwa 25 €. Es wird von der konservativen Annahme ausgegangen, dass sich die Einbaukonstruktion auf nicht mehr als 20 Flugzeuge identischen Baumusters umlegen lässt. Je nach Gesamtzahl der bestückten Flugzeuge und nach Anzahl der zur meteorologischen Nutzung freigeschalteten Vertikalprofile kann der Preis um bis zu 50 % schwanken. Die AMDAR-Profile decken in etwa 80 % der Fälle den Höhenbereich vom Boden bis zu einer Höhe zwischen 500 hPa und 200 hPa ab (Starts). Nur in 20 % beschränkt sich die Höhe auf den Bereich unterhalb 500 hPa (Landungen). Radiosondenprofile, die bei gleicher Messdatenqualität bis in 100 hPa oder auch höher reichen, kosten aber allein für das Material mindestens 150 €.

Abgesehen von ihrer geringeren vertikalen Reichweite sind die AMDAR-Profile für die Assimilation in die numerische Wettervorhersage den Radiosonden-Profilen in ihrer physikalischen Messqualität ebenbürtig. E-AMDAR hat über Europa zumindest tagsüber eine solche zeitliche und räumliche Abdeckung, dass bei einer Bestückung von nur 50 Flugzeugen mit Feuchtesensoren die 12-UTC-Aufstiege von genau den 20 aerologischen Stationen entfallen könnten, die sich an oder in der Nähe von internationalen Flughäfen befinden. Nach weniger als 10 Jahren wären dann die Investitionen in die Flugzeuganpassungen allein durch die Ersparnisse in den Radiosonden-Beschaffungen amortisiert.

## 2.2 ADS-B/-C

Gemäß ICAO Annex 3 muss jedes Flugzeug an sogenannten Reporting Points oder in bestimmten zeitlichen Abständen routinemäßig eine Positionsmeldung absetzen. In der Vergangenheit wurden diese als verbale Meldung per Funk an die zuständige Flugsicherungsstelle übermittelt. Mit Einführung von ADS (Automated Dependent Surveillance) erfolgt dies mit zunehmendem Maße automatisch.

Es gibt zwei unterschiedliche ADS-Systeme: ADS-B und ADS-C (contract), auch ADS-A genannt (addressed). Bei ADS-B werden die Position und andere Flugdaten, wie Flugnummer, Flugzeugtyp, Zeitsignal, Geschwindigkeit, Flughöhe und geplante Flugrichtung kontinuierlich – typischerweise einmal pro Sekunde – und ungerichtet abgestrahlt. ADS-C hingegen ist eine vom Boden gesteuerte Abfrage an das Flugzeug.

Primär wird ADS-B von der Flugsicherung zur Ortung und Überwachung von Luftfahrzeugen zur Erhöhung der Sicherheit durch verbesserte Informationen für den Piloten über die Flugzeugumgebung eingesetzt. ADS-B wird heute in Regionen verwendet, in denen es keine flächendeckende Radarüberwachung gibt, zum Beispiel Alaska oder Australien oder als Ersatz für das Bodenradar zur Überwachung der Luftfahrzeuge in der Luft, auf dem Vorfeld und den Rollbahnen von Flughäfen.

Jede ADS-Meldung kann auch einen meteorologischen Datenblock enthalten. Gefordert ist dies allerdings nur in bestimmten Zeitabständen, welche nicht variabel sind. Der meteorologische Datenblock muss von der empfangenden Bodenstation, in der Regel eine Flugsicherungsstelle, ausgeschnitten und nach ICAO Annex 3 an die World Area Forecast Centres (WAFS) geschickt werden. Obwohl jede ADS-Meldung eine Flugzeugkennung enthält, ist eine direkte Zuordnung der Wetterdaten zu einem bestimmten Flugzeug zwecks Qualitätssicherung nur bedingt möglich. Als Identifikation wird in der ADS-Meldung nicht das

Flugzeugkennzeichen, sondern entweder die Flugnummer oder ein künstliches, aber eindeutiges Kennzeichen (Callsign) verwendet.

Erste Untersuchungen (DE HAAN et al. 2013) ergeben, dass die meteorologischen Daten aus ADS-C eine mit AMDAR vergleichbare Qualität haben. Bislang aber werden die Daten wegen der noch fehlenden routinemäßigen Qualitätskontrolle noch nicht in den numerischen Vorhersagen verwendet.

### 2.3 Mode-S-Radar

Bei diesem System handelt es sich um ein sogenanntes Sekundärradar mit einer Reichweite von 270 km, auf dessen Signal in gezielter Auswahl die Transponder der Flugzeuge angestoßen werden, Identifikationsdaten und andere Flugzustandsinformationen auszusenden. Unter anderem sind darin auch enthalten

- a) Flughöhe,  
umrechenbar in den statischen Druck,
- b) Mach-Zahl,
- c) Fluggeschwindigkeit (TAS),  
zusammen mit b) lässt sich die statische Temperatur berechnen,
- d) Steuerkurs aus Magnetkompass,  
umzurechnen in den wahren Steuerkurs,
- e) Grundgeschwindigkeit (Betrag der Geschwindigkeit über Grund),
- f) Bahnazimut (Flugbahnrichtung über Grund),  
zusammen mit c), d) und e) ergibt sich der horizontale Windvektor,
- g) Rollwinkel,  
benötigt für die Qualitätskennung des Windes.

Auf Grund der begrenzten numerischen Auflösung der Mach-Zahl und der Fluggeschwindigkeit resultiert eine eingeschränkte Genauigkeit in der berechneten Temperatur. Die hochfrequente Abfrage der Flugzeuge (4 s) ergibt zum Beispiel in einem Umfeld wie dem von Amsterdam Schiphol einen hohen Ertrag von 1,5 Millionen Messungen pro Tag (DE HAAN 2009). Erste Resultate der Assimilation von Mode-S-Daten in numerischen Modellen finden sich unter anderem in DE HAAN und STOFFELEN (2010).

### 2.4 TAMDAR

#### 2.4.1 Messphysik

Im Gegensatz zu AMDAR baut das System TAMDAR zumindest im Routinebetrieb nur zu einem Teil auf den bereits auf dem Flugzeug befindlichen Sensoren auf. Die Druckparameter und eine messkammerinterne Temperatur und Feuchte sowie die gegebenenfalls auftretende Vereisung werden auf der Basis eines eigenen Sensormoduls gemessen, das gesondert in das Flugzeug eingebaut werden muss. Zudem wird das Flugzeug mit Antennen für GPS und Satellitenkommunikation ausgestattet (IRIDIUM oder K<sub>u</sub>-Band-Satelliten). Die für die Windberechnung erforderlichen Lagewinkel, zumindest der Steuerkurs, werden von den Datenbussen der Avionik abgezweigt. Die Druck- und Temperaturmessungen erfolgen in einer kleinen flügelstumpfähnlichen Vorrichtung an dem Modul (siehe Abb. 16). Alle diese Parameter müssen auf der Basis der standardmäßig auf dem Flugzeug bereits vorhandenen Drücke und Temperaturen kalibriert oder permanent gestützt werden. Eine gewisse Anzahl normaler Betriebsstunden eines Exemplars des jeweils verwendeten Flugzeugtyps werden einmalig für die Kalibrierung benötigt. Diese Rahmenbedingungen gelten grundsätzlich für alle Druck- und Temperaturmessverfahren, die nachträglich in ein Flugzeug integriert werden. In DANIELS et al. (2004) sind typische Beispiele der aerodynamisch bedingten Wechselwirkungen zu sehen. Wenn die Messgröße des Steuerkurses nur über den Magnetkompass verfügbar ist, müssen solche Vermessungszeiten nicht nur für ein bestimmtes Flugzeugbaumuster sondern individuell für jedes einzelne Flugzeug durchgeführt werden. In dem TAMDAR-Messgehäuse befinden sich auch zwei kapazitive Feuchtemesselemente. Zudem ist an der Vorderkante des Sensors eine Mulde, in der eine Messvorrichtung für Vereisungsprozesse eingebettet ist.

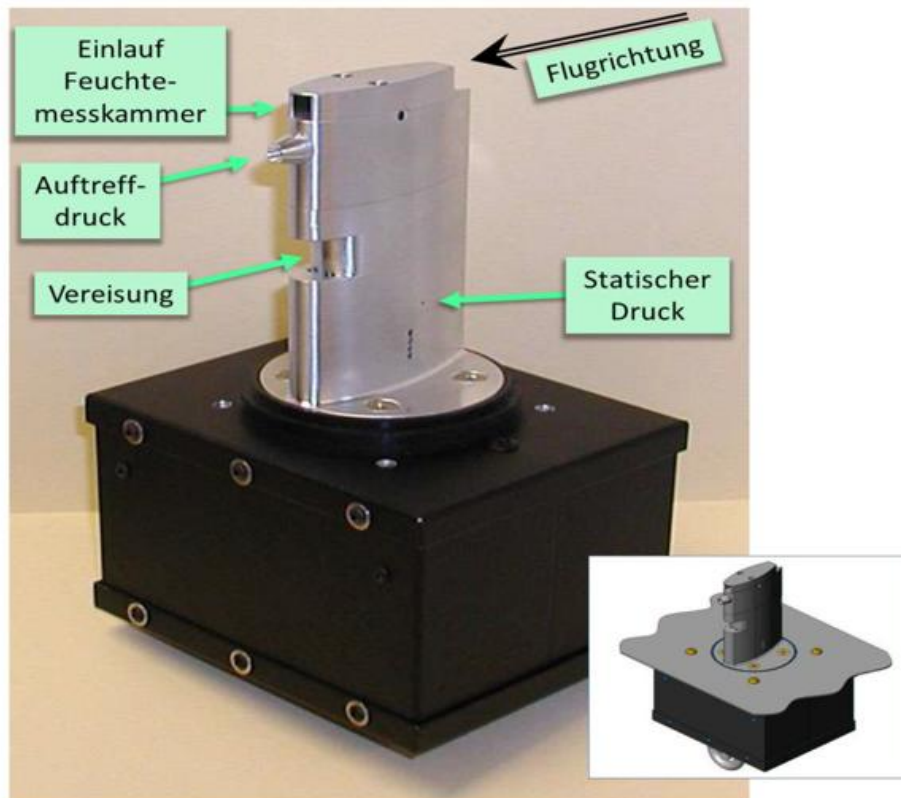


Abb. 16: Das TAMDAR-Sensor-Modul wird so in der Flugzeugzellenwand montiert, dass die Strömung weitestgehend parallel zur Symmetrieebene der Sonde verläuft. Sondenhöhe über dem Flansch: etwa 10 cm (Quelle: Panasonic, USA).

Das System stellt letztlich die Parameter

- Kennung,
- Position,
- statischer Druck,
- statische Temperatur,
- Wind,
- relative Luftfeuchte,
- Vereisung und
- Turbulenz (aus Vertikalbeschleunigungsdaten)

zur Verfügung.

In einer Studie (MONINGER et al. 2010) konnte gezeigt werden, dass die Hinzunahme der auf Flotten regionaler Fluggesellschaften durchgeführten TAMDAR-Messungen die Fehlerquoten von numerischen Wettervorhersagemodellen merklich senkt.

#### 2.4.2 Dateninfrastruktur und Kosten

Die Daten werden über das Kommunikationsnetzwerk eines Satellitensystems an das Rechenzentrum des Messdienstleistungsanbieters Panasonic, USA, geleitet. Dort findet die auf einem Vergleich mit einer kurzfristigen Vorhersage („First-Guess“) eines numerischen Vorhersagemodells basierende Qualitätskontrolle statt. Danach werden die Messdaten, mit Qualitätskennzeichen versehen, dem jeweils vertraglich verbundenen Wetterdienst exklusiv zur Verfügung gestellt. Die Geschäftsgrundlage von Panasonic ist aber nicht allein die Messdienstleistung. Die Fluggesellschaft, auf deren Flugzeuge die TAMDAR-Systeme integriert werden, erhält damit ein Kommunikationssystem, das einen Leistungsumfang von ACARS und mehr hat. Es sind in aller Regel die kleineren, bislang nicht mit ACARS ausgestatteten Regionalfluggesellschaften, deren Flotten als Träger von TAMDAR in das Geschäftsmodell von Panasonic passen.

Sämtliche Integrations- und Betriebskosten werden auf die Mess- und Kommunikationsdienstleistung umgelegt. Der vertraglich verbundene Wetterdienst zahlt einen festen Preis für jedes Vertikalprofil. Die Nutzungsrechte an diesen Daten sind bis auf vorübergehende Ausnahmen auf den Vertragspartner, also den betreffenden Wetterdienst beschränkt (Stand 2012). Die wetterdienstlichen TAMDAR-Nutzer haben keine vertraglichen oder organisatorischen Bindungen an die mit den Instrumenten ausgestatteten Fluggesellschaften. Die gesamte Koordinationsarbeit der Sensorintegration auf den Flugzeugen liegt in der Hand des Dienstleistungsanbieters Panasonic, USA.

### 3 Bestimmung und Korrektur von Messfehlern

#### 3.1 Eigenschaften des Messfehlers

Die Sensoren, die zur Bestimmung der über AMDAR und MDCRS gemeldeten atmosphärischen Größen eingesetzt werden, sorgfältig zu warten und genau zu kalibrieren liegt schon im Eigeninteresse der beteiligten Fluglinien, denn diese Größen werden unter anderem in der Triebwerkssteuerung und zur Vorhersage des Treibstoffbedarfs benötigt. Wie sich in zahlreichen, flugzeuggestützten Experimenten aber gezeigt hat, können auch bei sorgfältiger Kalibration die schlussendlich bestimmten atmosphärischen Größen signifikante Messabweichungen aufweisen. Zum Beispiel eine Differenz von fast 1 K zwischen den Temperaturmesswerten von zwei in enger Formation fliegenden Flugzeugen (NICHOLLS et al. 1983). Die Anforderungen an die Genauigkeit der Einzelmessungen zeigen sich besonders bei der Wind-Berechnung. Der Wind wird, wie schon in 0 (3) erklärt, als Vektordifferenz zwischen den Geschwindigkeiten des Flugzeugs gegenüber dem Grund (Groundspeed, GS) und der Luft (True Airspeed, TAS) berechnet. Die typische Reiseflug-Geschwindigkeit beträgt rund 225 m/s (800 km/h), die mittleren Windgeschwindigkeiten in der oberen Troposphäre betragen nur rund 22 m/s (BIRNER et al. 2002). Ein relativer Fehler in TAS bzw. GS von 1 % verursacht somit einen Fehler der Windgeschwindigkeit von rund 15 %.

Würde man die Unsicherheit der Zielgrößen Temperatur, Windgeschwindigkeit und –richtung durch Fehlerfortpflanzung aus den Unsicherheiten der beteiligten Messsysteme berechnen, würden sich in der Regel für meteorologische Zwecke nicht akzeptable Werte ergeben.

Man kann sich jedoch zunutze machen, dass sich die Unsicherheiten der einzelnen Messsysteme jeweils aus einem zufälligen und einem systematischen Fehler zusammensetzen. Der systematische Fehler wiederum setzt sich zusammen aus einer systematischen Messabweichung des jeweiligen Messgeräts sowie aus Abweichungen, die systematisch von verschiedenen flugdynamischen Größen (zum Beispiel Geschwindigkeit oder Nickwinkel) abhängen. Wenn es gelingt, die systematischen Fehler zu bestimmen, kann die Unsicherheit der Zielgrößen erheblich reduziert werden. Wenn man den systematischen Fehler als Korrektur auf den Wert der Zielgröße anwendet, ergibt sich dadurch eine deutlich reduzierte Unsicherheit (siehe zum Beispiel VÖRSMANN et al. 1989).

#### 3.2 Mittlere Abweichungen

Da sich systematische Fehler der Ausgangsgrößen im Wesentlichen in einer konstanten Abweichung der Zielgröße ausdrücken, kann man auch vereinfachend den systematischen Fehler der Zielgröße bestimmen. Die einfachste Methode zur Bestimmung des systematischen Fehlers der Zielgrößen Windgeschwindigkeit, -richtung und Temperatur besteht darin, sie mit einer anderen Messung bzw. Referenz zu vergleichen. Zu diesem Zweck wurden AMDAR-Daten in der Vergangenheit mit Radiosondenaufstiegen (BALLISH und KUMAR 2008) UND einem RASS (Radio Acoustic Sounding System) verglichen (DRÜE et al. 2010). Dabei ergab sich im Mittel eine Abweichung von +0,5 K gegenüber Radiosonden (zwischen 250 und 300 hPa) und von +0,2 K gegenüber dem RASS (unterhalb 1200 m).

Das grundlegende Problem bei der Bestimmung des systematischen Fehlers auf diesem Wege ist jedoch, dass auch das Vergleichssystem systematische Fehler aufweisen kann. Als Ausweg wurde in den bisherigen Studien daher jeweils ein Bezugswert - als beste Schätzung des wahren Wertes – definiert. In der Regel wurde dazu von einem numerischen Wettervorhersagesystem für den Zeitpunkt der Messung die letzte vor der Messung erstellte kurzfristige Vorhersage verwendet. Diese bietet sich an, da diese der bestmöglichen Aussage über den Zustand der Atmosphäre entspricht, der im Rahmen der in den Modellen wiedergegebenen Physik konsistent ist, aber im Gegensatz zu einer Analyse ohne Verwendung der zu vergleichenden Messdaten selbst zustande gekommen ist. Im Vergleich zu den 6-Stunden-Vorhersagen des NCEP GFS (US National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System)-Modells ergab sich so eine Abweichung aller AMDAR-Daten von etwa +0,2 K (BALLISH und KUMAR 2008).

Wenn man nun auf diese Weise die mittlere Messabweichung jedes Flugzeug bestimmt, könnte man alle Messwerte dieses Flugzeugs entsprechend korrigieren. Die einzelnen Messwerte streuen jedoch stark um die Vorhersagewerte. Man benötigt viele ( $O(10^4)$ ) Messwerte um die mittlere Messabweichung mit akzeptabler Unsicherheit zu bestimmen. In der Praxis stellt sich jedoch heraus, dass die Abweichungen zeitlich nicht konstant sind und je Flugzeug oft zu wenige Messwerte in einem begrenzten Zeitraum (in der Regel ein Monat) vorliegen. Es fiel jedoch auch auf, dass die Abweichungen aller Flugzeuge eines Modelltyps recht ähnliche Werte aufweisen. BALLISH und KUMAR (2008) schlagen daher vor, monatlich für jeden Flugzeugtyp die Abweichung zu bestimmen und damit die entsprechenden Messungen zu korrigieren. Sowohl EZMW (Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage) als auch der DWD wenden mittlerweile Korrekturverfahren für diese Abweichungen an. Zuvor wurden die Monatsmittel der Abweichung jedoch nur zur Ermittlung auffälliger Flugzeuge benutzt. Die mittleren Abweichungen gegen das amerikanische GFS-Modell finden sich unter <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/qap/>, die Abweichungen gegen der europäischen AMDAR Flugzeuge werden vom E-AMDAR QEvC beim KNMI bereitgestellt unter <http://www.knmi.nl/samenw/geoss/eumetnet/E-Amdar/QEvC/index.html>.

### 3.3 Systematische Abhängigkeiten

Wie bei den meisten flugzeuggetragenen Sensoren, weisen die zur Ermittlung der AMDAR-Zielgrößen benutzten Messsysteme Messabweichungen auf, die von flugdynamischen Größen abhängen. So hängt die Messabweichung des Temperatursensors in seinem Schutzgehäuse von der Fluggeschwindigkeit sowie der Anströmrichtung des Gehäuses und damit der Fluglage (Nick- und Rollwinkel) ab. Für den Temperatursensor einer Dornier 228 wurden beispielsweise  $0,05 \text{ K}^\circ$  bestimmt (DRÜE 2011).

Da diese Abhängigkeiten nur im Flug bestimmt werden können, ist es bei Forschungsflugzeugen Standard, zu diesem Zweck Kalibrationsflüge durchzuführen (LENSCHOW 1986, TJERNSTRÖM & FRIEHE 1991, DRÜE & HEINEMANN 2013). Dabei führt das Messflugzeug in der Regel spezielle Manöver aus, durch die je eine flugdynamische Größe wie zum Beispiel Geschwindigkeit oder (Flug-)Lagewinkel variiert wird. Dabei wird möglichst immer wieder das gleiche Luftvolumen durchflogen. Ein solches Vorgehen ist bei Verkehrsmaschinen jedoch ökonomisch nicht machbar. Man kann jedoch die im normalen Betrieb auftretenden Variationen flugdynamischer Größen ausnutzen in dem man die Abweichungen der Zielgrößen mit den flugdynamischen Größen korreliert. Die Größen Flughöhe, -geschwindigkeit und -richtung ergeben sich einfach aus den AMDAR-Meldungen selbst. Die anonymisierten Flugzeugkennungen in AMDAR einem Flugzeugtyp zuzuordnen ist nicht jedermann möglich; Wetterdienste und kooperierende Forschungseinrichtungen können diese Zuordnung jedoch beim technischen Koordinator für E-AMDAR erfragen. Im Vergleich der AMDAR-Vertikalprofile einzelner Flugzeugtypen mit dem Mittel aller Typen ergaben sich am Flughafen Frankfurt für die meisten Typen nahezu höhenkonstante Abweichungen von  $-0,5 \text{ K}$  bis  $+0,5 \text{ K}$  (DRÜE et al. 2008). Für einige Typen (B747, A319) ergab sich jedoch eine Abnahme der Abweichung mit der Höhe von etwa  $0,2 \text{ K/km}$ . Besonders erstaunlich ist die systematische Differenz von rund  $1 \text{ K}$  zwischen den fast baugleichen Typen A320 und A321. Die Windgeschwindigkeit weicht für die einzelnen Typen typischerweise um  $\pm 0,4 \text{ m/s}$  ab, schwankt jedoch stark mit der Höhe. Betrachtet man jedoch die Abweichungen im Koordinatensystem des Flugzeugs, ergeben sich vor allem in Flugrichtung wesentlich höhenkonstantere und weniger stark streuende Abweichungen. Es liegt also nahe, den Fehler der AMDAR-Windmessungen als einen flugzeugfesten Vektor zu betrachten, der also mit der Flugrichtung mitgedreht wird.

Um bekanntermaßen einflussreiche, flugdynamische Größen wie Nick- und Rollwinkel, Masse und Vertikalgeschwindigkeit (siehe zum Beispiel WILLIAMS & MARCOTTE 2000) zu bestimmen, wurde von DRÜE (2011) ein Algorithmus zur Rekonstruktion der Flugbahn entwickelt (Abb. ). Der Vergleich der Messabweichungen mit diesen Größen steht jedoch noch aus. Die Anwendung eines darauf aufbauenden Fehlermodells erlaubt voraussichtlich eine Reduktion des systematischen Temperaturfehlers um nochmals etwa  $0,25 \text{ K}$ .

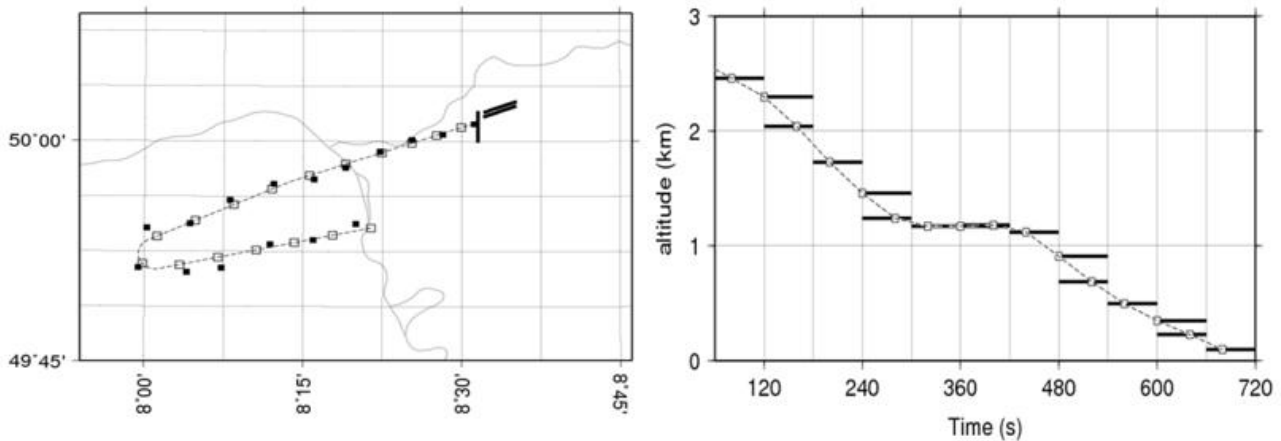


Abb. 17: Beispiel für Rekonstruktion der Trajektorie: Anflug der Einheit EU4593 auf Frankfurt, links Draufsicht, rechts Höhe gegen Zeit. Schwarze Punkte bzw. Balken: AMDAR-Positionsmeldungen (Zeit der Einzelmessung nur auf 1 Minute genau, weil Sekunden bislang nicht übermittelt werden), weiße Quadrate: rekonstruierte Positionen dieser Meldungen, gestrichelte Linie: rekonstruierte Trajektorie.

### 3.4 Impaktstudien

Den Mehrwert von Flugzeugmessdaten für die Wettervorhersage zu bestimmen war bisher Ziel einer überschaubaren Anzahl von Studien. Für erste verfügbare ACARS-Daten über den USA hatten BENJAMIN et al. (1991) schon ein geeignetes Assimilationsschema entwickelt und dargestellt, dass sich die Vorhersagen, vor allem die Topographie der 500 hPa-Druckfläche deutlich verbessern, obwohl die Flugzeugdaten damals räumlich noch wenig dicht und zeitlich sehr unregelmäßig erhoben wurden. Eine neuere Auswertung am Forecast Systems Laboratory (FSL) der NOAA ergab eine Verbesserung des mittleren Vorhersagefehlers der Windgeschwindigkeit über den USA in 250 hPa-Höhe von 0,35 m/s, entsprechend 7 %, durch die an Wochentagen stark vermehrte Assimilation von ACARS-Daten (als US-AMDAR) (PETERSEN et al. 2004). Wegen des Flugverbotes vom 11. bis 13. September 2001 wurden keine ACARS-Daten erzeugt und der Vorhersagefehler des Windes in 250 hPa stieg für die Drei-Stunden-Vorhersage um 20 % (PETERSEN et al. 2004).

CARDINALI et al. (2003) haben Vorhersagen unter Verwendung aller AMDAR-/ACARS-Daten während der Datenassimilation mit Vorhersagen, bei denen genau diese Daten von Auf- und Abstiegen unterhalb 350 hPa in der Datenassimilation ausgeschlossen wurden, verglichen um festzustellen, ob ein modernes 4D-VAR-Assimilationsverfahren davon profitiert, dass die Flugzeugdaten irregulär in Raum und Zeit verteilt erhoben werden. Die Ergebnisse zeigen im Mittel einen signifikanten, positiven Einfluss auf die Vorhersagegüte. Bei kurzen Vorhersagen vor allem über Nordamerika, Europa und dem Nordatlantik und bei Vorhersagen über eine mittlere Vorhersagedauer finden CARDINALI et al. (2003) eine signifikante Verbesserung über dem Nordatlantik und Europa (letzteres nur im Winter).

CARDINALI et al. (2004) haben einen Vergleich von Vorhersagen des EZMW mit dem GADS (Global Aircraft Data Set) Datensatz (RUKHOVETS et al. 1998) durchgeführt. Dieser wird aus Flugschreiberdaten auf British Airways 747-400-Maschinen für die New York State University in Purchase erhoben. Dabei zeigte sich, dass die Maximalgeschwindigkeit des Jet-Streams von der Analyse um 2 bis 5 % unterschätzt wird und durch zusätzliche Assimilation der GADS-Daten um 2 bis 3 % verbessert werden könnte, insbesondere bei Vorhersagen über 24 bis 72 Stunden in 250 hPa.

PETERSEN et al. (2004) haben den Einfluss der Flugzeugdaten auf die numerischen Wettervorhersagen abzuschätzen versucht, in dem Sie die normalen Vorhersagen und Vorhersagen, bei denen alle Flugzeugdaten unterhalb 350 hPa während der Datenassimilation verworfen worden waren, verglichen haben. Dabei ergaben sich für die Vorhersagen von 3 bis 48 Stunden Vorhersagezeit signifikante Verbesserungen, wenn Flug-

zeugdaten in der Assimilation verwendet wurden. Der mittlere Fehler des Windes nahm bei Verwendung der Flugzeugdaten typischerweise um 1 kt, maximal bis über 10 kt, ab. Die stärkste Abnahme mit bis zu 20 % trat dabei in Höhe der 250-hPa-Fläche auf.

Die Bedeutung der von Flugzeugen gemessenen Luftfeuchte haben MATI et al. (2009) untersucht. Sie konnten dabei durchweg einen positiven, aber sehr kleinen Einfluss (etwa einstelliger Prozentbereich) feststellen. MONINGER et al. (2010) schließlich haben den Einfluss der TAMDAR-Daten von vergleichsweise niedrig fliegenden Propellermaschinen untersucht. Dabei ergab sich, dass in der 3-Stunden-Vorhersage der mittlere Vorhersagefehler der Temperatur um bis zu 0,4 K abnimmt, abhängig von der Vertikalwindgeschwindigkeit. Entsprechend nehmen die Fehler der Luftfeuchte um 3 % und der Windgeschwindigkeit um etwa 0,25 m/s ab.

## 4 Perspektiven des weltweiten Ausbaus der Luftfahrt für die meteorologische Datenerfassung einschließlich des Wasserdampfes

Die weltweite Überdeckung mit AMDAR oder ähnlichen Flugzeugmessungen gibt Abb. 18 wieder. Ein großer Flächenanteil dieser AMDAR-Abdeckung rekrutiert sich aus den Messungen in Reiseflughöhe. Beschränkt man die Darstellung auf den Höhenbereich von 0 bis 5 500 m (siehe Abb. 19), dann wird erkennbar, dass in den Vertikalprofilmessungen weltweit große Bereiche leer bleiben.

Die weltweite Überdeckung mit Flugverkehr aller Art ist deutlich größer. Es wird die Aufgabe zu bewältigen sein, die AMDAR-Funktionalität inklusive wenigstens der Feuchtemessung letztendlich für alle Verkehrsflugzeuge aktivierbar zu machen. Hierfür stehen drei Wege offen.

### 4.1 Nachträgliche Flugzeuganpassungen

Jedes Verkehrsflugzeug das heutzutage (2013) produziert wird, verlässt die Werkshallen so, dass nur die technische Basis eines Flugzeug-Boden-Kommunikationssystems und die Sensorik für Position, Flugzeug Eigenbewegung, Druckhöhe, Temperatur und Wind bereit stehen. Alle weiteren für meteorologische Messfähigkeit erforderlichen Funktionselemente, ob Software oder Hardware, müssen nachträglich in ein existierendes Gesamtsystem eingepasst werden. Solche individuell flugzeugbaumuster- und kommunikationssystemgebundenen Modifikationen sind machbar. Aber mit jeder neuen Systemgeneration des Flugzeugs und der Avionik muss der konstruktive Teil erneut finanziert werden. Wenn auf der Flugzeugseite die Änderungskonstruktion den Rang eines Supplemental Type Certificate (STC) bekommt, so besteht nur die Möglichkeit der Übertragung auf baugleiche Muster anderer Flotten.

De facto besitzen die spezifisch für Feuchtemessbetrieb geänderten Flugzeuge innerhalb der Flotte einer Fluggesellschaft einen Sonderstatus. Die Perspektive der Sonderbehandlung der Feuchte-Maschinen in Aufbau und Routinebetrieb trifft auf unterschiedliche Zuneigung der Fluggesellschaften zu Projekten dieser Art. Die Fluggesellschaft wird sich immer die flottenstrategische Planungsfreiheit vertraglich absichern. Es erfordert von dem jeweiligen Wetterdienst geschäftspolitisches Verhandlungsgeschick und die Bereitschaft, von Zeit zu Zeit Modifikationen oder Fortschreibungen der existierenden Verträge zu erwirken.

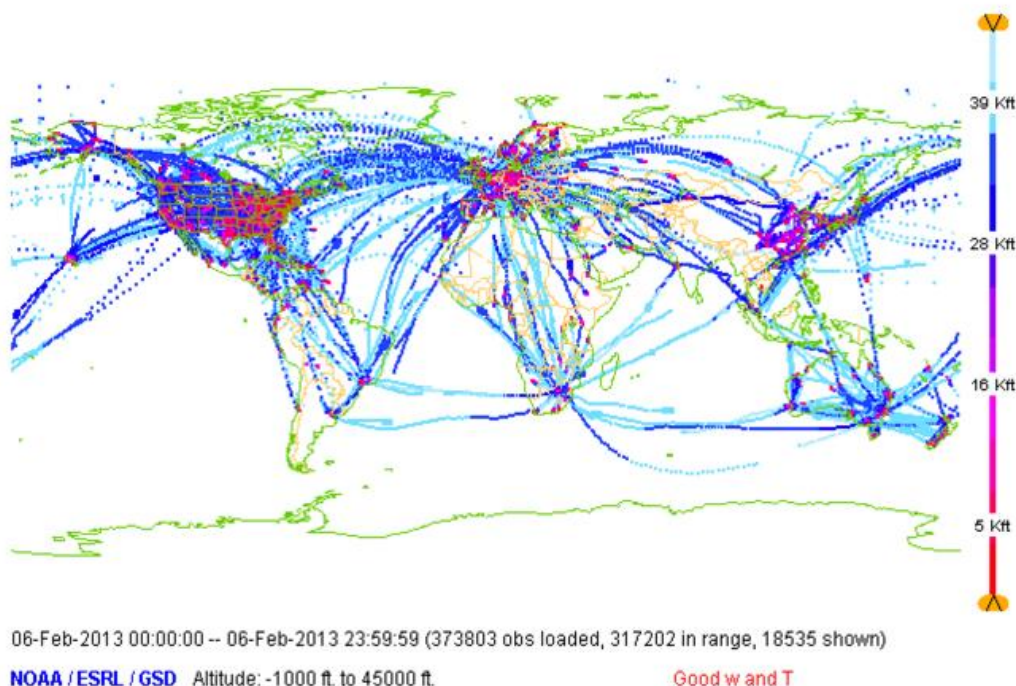


Abb. 18: AMDAR-Messungen weltweit, 24-Stunden-Zeitraum, 06.02.2013, alle Höhen. NOAA-Internet-Seite: [amdar.noaa.gov/java/](http://amdar.noaa.gov/java/).

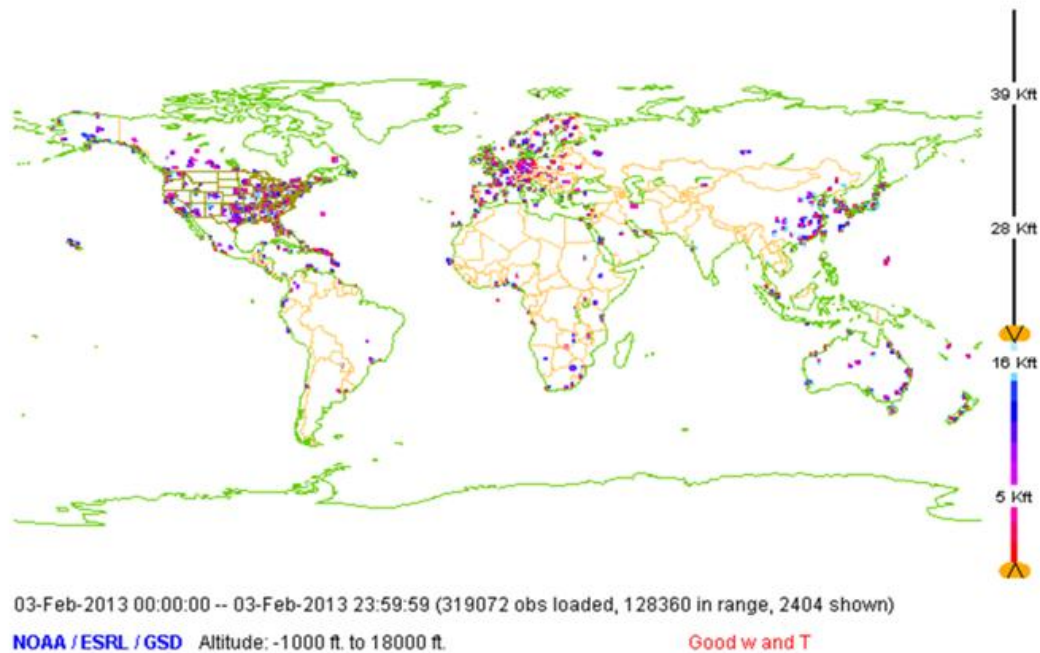


Abb. 19: AMDAR-Messungen weltweit, 24-Stunden-Zeitraum, 06.02.2013, 0 bis 5 500 m, NOAA-Internet-Seite: [amdar.noaa.gov/java](http://amdar.noaa.gov/java).

#### 4.2 Werkseitige Vorbereitung von Flugzeugbaureihen

Sehr gut wäre es, wenn alle Flugzeuge oder zumindest die wegen ihres typischen Einsatzprofils geeigneten Flugzeugtypen bereits werkseitig für die meteorologischen Messaufgaben ausgestattet sind. Auf Seiten der Fluggesellschaften entstünde kein Modifikationsaufwand. Der Routinebetrieb wäre einheitlich. Der finanzielle Aufwand für eine nachhaltige Änderung der Flugzeugbaureihen für zum Beispiel AMDAR-Fähigkeit inklusive Feuchtemessung könnte mit dem Ausblick auf eine weltweit verbreitete meteorologische Nutzung auf die messbetrieblich zu aktivierenden Exemplare umgelegt werden. Abhängig davon, ab welcher Stückzahl und zu welchem Zeitpunkt der sogenannte Break-Even-Point erreicht sein soll, kann diese Lösung deutlich preiswerter und bestandskräftiger sein als die immer wieder zu erzeugenden Retrofits in der Vorgehensweise im vorangehenden Abschnitt 0. Dazu kommt, dass in nicht ferner Zukunft die Flugzeuge aus Verbundwerkstoffen gebaut werden, die einen nachträglichen Einbau von Teilen in die Struktur extrem teuer werden lassen.

Eine Systemlösung, wie sie hier vorgeschlagen ist, hat aber nur zwei Nutznießer, nämlich die Wetterdienste und indirekt die Luftfahrt, weil sie, wie bei AMDAR generell, von den verbesserten Wettervorhersageleistungen profitiert.

#### 4.3 Integration von AMDAR in die Konzepte kommender Generationen der Luftfahrtssystemtechnik

Nachrichtentechnisch muss die wetterdienstliche Nutzung von Atmosphärenmessdaten der Flugzeuge zum weltweit bindenden Standard in der Luftfahrt-IT werden.

Die Integration weiterer Sensorik auf den Flugzeugen muss auf die Basis eines breiteren Interesses gestellt werden. Die insgesamt profitabelste Lösung wäre es, wenn der Nutzeffekt einer Einbeziehung der Wasserdampfmessungen sich nicht nur auf die Leistungsfähigkeit der Wetterprognosen beschränken würde sondern der Betriebssicherheit und –ökonomie der Flugzeuge direkt dienen könnte, die als Trägersysteme dieser Instrumente fungieren.

#### 4.3.1 Vereisungswarnung

Bislang wird die Warnung vor der Vereisung von Flügelvorderkanten und Triebwerkseinläufen nur von bedingt zuverlässigen Sensoren ausgelöst, die ihr Signal erst geben, wenn die Ansammlung von Eis bereits begonnen hat. Es obliegt der Aufmerksamkeit und Einschätzungsfähigkeit der Cockpitbesatzung, den überlebenswichtigen Enteisungsprozess im rechten Moment in Gang zu setzen.

Vereisung kann nur dann einsetzen, wenn zwischen 0 und -20 °C (bis sogar -30 °C) flüssige, also unterkühlte Flüssigwasserpartikel vorhanden sind, wenn also die relative Feuchte bezogen auf den Sättigungsdampfdruck der Flüssigkeitsoberfläche bei 100 % liegt. Sicherheitshalber kann eine Feuchteschwelle etwas unterhalb von 100 % verwendet werden. Dieses kritische Temperatur-Feuchtefenster kann durch die bisherige luftfahrtstandardmäßige Instrumentierung nicht identifiziert werden. Die Warnung vor Vereisung besteht bislang aus den meteorologischen Vorhersagen über ein zu erwartendes Gefahrenpotential. Eine gegebenenfalls reale Annäherung an den kritischen Temperatur-Feuchte-Bereich ließe sich auf der Basis einer Feuchteinstrumentierung im Cockpit anzeigen. Sogar eine Automatisierung des Enteisungsvorgangs wäre denkbar. Ein weiterer Aspekt der Wasserdampfabhängigkeit mag auch noch im Bereich der Triebwerkstechnik auf den Plan rücken. Mit der Entwicklung zu immer höheren thermodynamischen Wirkungsgraden der Aggregate kann es sein, dass interne Vereisungsprozesse systematisch abgefangen werden müssen.

In jedem Fall entstünde durch die Ausstattung mit Feuchtesensoren und deren Anwendung, zum Beispiel zur Warnung im Cockpit vor Vereisungssituationen, eine höhere Sicherheit im Luftverkehr. Der Nutzen kommt neben den Wetterdiensten auch den Flugzeugbetreibern und der Flugsicherung zugute.

#### 4.3.2 Ökonomische Aspekte bei der Steuerung des Enteisungsprozesses

Es ist nicht auszuschließen, dass bei phasenweise kritischen Arbeitsbelastungssituationen im Cockpit der energieintensive Enteisungsvorgang (etwa 10 % der Triebwerksleistung) aus Sicherheitsgründen länger aufrechterhalten wird, als es die reale Gefährdungssituation erfordert. Es gibt für die Cockpit-Crew nicht immer absolut sichere Indikatoren, die ein Vereisungsrisiko vollkommen ausschließen. Ein direkt verfügbarer Wasserdampfmesswert zusammen mit der Temperatur wäre ein solcher Indikator, der gegebenenfalls anzeigen könnte, dass das Flugzeug sich fernab des kritischen Temperatur-Feuchte-Fensters befindet. Möglicherweise wäre sogar eine Automatisierung der Abschaltung denkbar. Im Endeffekt würde der Brennstoffverbrauch reduziert.

Hier entstünde für die Umwelt die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Produktion und für die Fluggesellschaften der rein ökonomische Nutzen der Feuchteinstrumentierung der Flugzeuge.

#### 4.3.3 Kondensstreifen

Ein bislang ungelöstes Umweltschutzproblem sind die luftverkehrsbedingten Kondensstreifen in der oberen Troposphäre. Sie können in den Bereichen entstehen, wo der aktuelle Wasserdampfdruck oberhalb des Sättigungsdampfdruckes über Eis liegt (ISSR, Ice-Supersaturated Regions). Mangels Kondensations- bzw. Sublimationskernen entstehen keine Wolken. Erst das Impfen durch Partikel der Flugzeugabgase löst die Bildung der Wolkeneiskristalle aus.

Die Vorhersage oder unmittelbare Analyse der ISSRs ist bislang nicht möglich. Eine flugzeuggebundene Wasserdampfmessung mit dem Ergebnis einer Übersättigung würde alleine noch keine eindeutige Identifikation der ISSR erlauben, da dieser Sensorzustand auch innerhalb einer ganz normalen Wolke eintritt. Eine adäquate Partikelsensorik ist erforderlich, um das Flugzeug in die Lage zu versetzen, gegebenenfalls die Erzeugung eines Kondensstreifens anzeigen zu können.

Für die Interessen des Umweltschutzes entsteht hier mit einer standardmäßigen Flugzeuginstrumentierung die Chance, über die Flugsicherung den Luftverkehr systematisch aus den ISSRs heraus zu dirigieren. Die

störenden Einflüsse der Kondensstreifen auf die Strahlungsbilanz der Atmosphäre könnten weitgehend vermieden werden.

Zudem würde eine Partikelsensorik gleichzeitig die Erkennung von Vulkanstaub ermöglichen, der für den Flugbetrieb von einschneidender Bedeutung sein kann.

## 5 Fazit

In den neunziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts waren es in erster Linie die Anstöße der Meteorologie, die Fluggesellschaften dahin zu bringen, ihre Flotten in den Dienst der Atmosphärenmessungen zu stellen. Die Aussicht auf eine merkliche Leistungssteigerung in der Wettervorhersage war und ist eine Motivation, an den Nachrichtensystemen der Flugzeuge Änderungen in Kauf zu nehmen. Merklich schwieriger gestaltet sich diese Motivationsarbeit, wenn zu den bislang luftfahrtstandardmäßigen Bordinstrumenten weitere hinzukommen sollen. Andererseits erfordert die permanente Weiterentwicklung der numerischen Atmosphärenvorhersagemodelle einen Ausbau des Messdatenangebotes in immer höherer Auflösung in Raum und Zeit. Der weltweite Flugverkehr bildet dafür eine wertvolle Plattform. Es gibt die Chance, die Interessen aller Beteiligten wie Wetterdienste, Fluggesellschaften, Flugsicherung, Umweltschutz und nicht zuletzt Flugzeughersteller einerseits aus flugsicherheitstechnischen aber vielmehr noch aus wirtschaftlichen Gründen dergestalt bündeln zu können, dass letztendlich alle Verkehrsflugzeuge ohne gesonderte Nachrüstungen zu den Atmosphärenmessungen standardmäßig beitragen.

## Literaturverzeichnis

- Aircraft Observations. *WMO* No. 8, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (CI-MO Guide), Part II, Chapter 3.
- BALLISH, B. A., KUMAR, V. K., 2008: Systematic Differences in Aircraft and Radiosonde Temperatures. *Bulletin of the American Meteorological Society* **89**, 1689-1707 doi: 10.1175/2008BAMS2332.1.
- BENJAMIN, S. G., BREWSTER, K. A., BRÜMMER, R., JEWETT, B. F., SCHLATTER, T. W.; SMITH, T. L., STAMUS, P. A., 1991: An Isentropic Three-Hourly Data Assimilation System Using ACARS Aircraft Observations. *Monthly Weather Review, American Meteorological Society* **119**, 888-906, doi: 10.1175/1520-0493(1991)1190888:AITHDA>2.0.CO;2.
- BIRNER, T., DÖRNBRACK, A., SCHUMANN, U., 2002: How sharp is the tropopause at midlatitudes? *Geophys. Res. Lett.* **29**(14), 1700, doi: 10.1029/2002GL015142.
- CARDINALI, C.; ISAKSEN, L., ANDERSSON, E., 2003: Use and Impact of Automated Aircraft Data in a Global 4DVAR Data Assimilation System. *Monthly Weather Review* **131**, 1865-1877 doi: 10.1175//2569.1.
- CARDINALI, C.; RUKHOVETS, L., TENENBAUM, J., 2004: Jet Stream Analysis and Forecast Errors Using GADS Aircraft Observations in the DAO, ECMWF, and NCEP Models. *Monthly Weather Review* **132**, 764-779 doi: 10.1175/1520-0493(2004)1320764:JSAAFE>2.0.CO;2.
- DANIELS, T. S., TSOUCALAS, G., ANDERSON, M., MULALLY, D., MONINGER, W., MAMROSH, R., 2004: Tropospheric Airborne Meteorological Data Reporting (TAMDAR) sensor development. Preprints, 11th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Hyannis, MA, *Amer. Meteor. Soc.*, 7.6. [Available online at <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/81841.pdf>.]
- DE HAAN, S., 2009: Quality assessment of high resolution wind and temperature observations from Mode S. *KNMI Scientific report*, WR 2009-07.
- DE HAAN, S., BAILEY, L. J., KÖNNEN, J. E., 2013: Quality assessment of Automatic Dependent Surveillance Contract (ADS-C) wind and temperature observation from commercial aircraft. *Atmos. Meas. Tech.* **6**, 199–206.
- DE HAAN, S., STOFFELEN, A., 2010: Assimilation of High Resolution Mode-S Wind and Temperature Observations in a Limited Area NWP-model, *KNMI Scientific Report* 2010-03.
- DRÜE, C.; FREY, W.; HOFF, A., HAUF, T., 2008: Aircraft type-specific errors in AMDAR weather reports from commercial aircraft. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **134**, 229-239 doi: 10.1002/qj.205.
- DRÜE, C.; HAUF, T., HOFF, A., 2010: Comparison of Boundary-Layer Profiles and Layer Detection by AMDAR and WTR/RASS at Frankfurt Airport. *Boundary-Layer Meteorology* **135**, 407-432.
- DRÜE, C., 2011: Reconstruction of Aircraft Trajectories from AMDAR Weather Reports. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **28**, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, American Meteorological Society, 921-932 doi: 10.1175/2011JTECHA1499.1.
- DRÜE, C., HEINEMANN, G., 2013: A practical in-flight calibration scheme for aircraft turbulence sensors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, in review.
- HOFF, A., 2009: WVSS-II Assessment at the DWD (*Deutscher Wetterdienst / German Meteorological Service*) Climate Chamber of the Meteorological Observatory Lindenberg.
- KLEINERT, T., 2012: *EUCOS Annual Quality Monitoring Report 2011*. Deutscher Wetterdienst, 18 u. 31
- LENSCHOW, D. H., 1986: Probing the Atmospheric Boundary Layer. *American Meteorological Society*, Boston.
- MATI, I., SARRAZIN, R., ZAITSEVA, Y., VERNER, G., 2009: Monitoring and Assimilation Impact Study of Moisture Data from Aircraft at the *Canadian Meteorological Center*. 3th Conference on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), January 10 - 16, Phoenix, AZ, USA.
- MAY, R. D., WEBSTER, C.R., 1993: Data processing and calibration for tunable diode laser harmonic absorption spectrometers. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **49**, 335-347.
- MONINGER, W. R., BENJAMIN, S. G., JAMISON, B. A., SCHLATTER, T. W., SMITH, T. L., SZOKE, E. J., 2010: Evaluation of Regional Aircraft Observations Using TAMDAR. *Weather and Forecasting* **25**, 627-645, doi: 10.1175/2009WAF2222321.1.

- NICHOLLS, S.; SHAW, W., HAUF, T., 1983: An Intercomparison of Aircraft Turbulence Measurements Made During JASIN. *Journal of Climate and Applied Meteorology* **22**, 1637-1648 doi: 10.1175/1520-0450(1983)022<1637:AIOATM>2.0.CO;2.
- PAINTING, D. J., 2003: AMDAR reference manual. *WMO-No. 958*, pp. [Available online at [http://amdar.wmo.int/Publications/AMDAR\\_Reference\\_Manual\\_2003.pdf](http://amdar.wmo.int/Publications/AMDAR_Reference_Manual_2003.pdf)].
- PETERSEN, R.A., MANIKIN, G., KEYSER, D., 2004: Summary of Impact Tests of Automated Wind / Temperature Reports from Commercial Aircraft. *World Meteorological Organization*, electronic resource: [http://www.wmo.int/amdar/Resources/AMDAR\\_Impact\\_Papers\\_2004/Summary%2520of%2520Impact%2520Tests%2520of%2520Automated%2520Wind.x.doc](http://www.wmo.int/amdar/Resources/AMDAR_Impact_Papers_2004/Summary%2520of%2520Impact%2520Tests%2520of%2520Automated%2520Wind.x.doc) (retrieved 2013-02-03).
- PETERSEN, R., CRONCE, L., FELTZ, W., OLSON, E., HELMS, D., 2011: Validation studies of WVSS-II moisture observations. 15th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans and Land Surface (IOAS-AOLS), *AMS Annual Meeting*, Jan 2011, Seattle, WA.
- RUKHOVETS, L., TENENBAUM, J., GELLER, M., 1998: The Impact of Additional Aircraft Data on the Goddard Earth Observing System Analyses. *Monthly Weather Review* **126**, 2927-2941 doi:10.1175/1520-0493(1998)126<2927:TIOAAD>2.0.CO;2.
- STICKNEY, T. M.; SHEDLOV, M. W., THOMPSON, D. I., 1994: Goodrich Total Temperature Sensors. *Goodrich Corporation*, Burnsville, Maine, USA.
- TJERNSTRÖM, M., FRIEHE, C. A., 1991: Analysis of a Radome Air-Motion System on a Twin-Jet Aircraft for Boundary-Layer Research. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **8** *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, American Meteorological Society, 19-40 doi: 10.1175/1520-0426(1991)0080019:AOARAM>2.0.CO;2.
- VANCE, A. K., WOOLLEY, A., COTTON, R., TURNBULL, K., ABEL, S., HARLOW, C., 2011: Final Report on the WVSS-II Sensors fitted to the FAAM BAe 146. *Met. Office, Exeter, & FAAM*, Cranfield
- VÖRSMANN, P., FRIEDERICI, B., HOFF, A., 1989: METEOPOD - ein flugzeuggestütztes Turbulenzmesssystem. *Promet* **19**, 57-64.
- WILLIAMS, A., MARCOTTE, D., 2000: Wind Measurements on a Maneuvering Twin-Engine Turboprop Aircraft Accounting for Flow Distortion. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **17** *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, American Meteorological Society, 795-810 doi: 10.1175/1520-0426(2000)0170795:WMOAMT>2.0.CO;2.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Die Messpositionen für statischen Druck, Auftreffdruck, Temperatur und Vereisung an einem Airbus A319 (Copyright: Björn Schmitt).....	9
Abb. 2: Die Messung der Außentemperatur am Flugzeug .....	12
Abb. 3: Winddreieck: .....	12
Abb. 4: Der Aufbau des in AMDAR verwendeten Feuchtemesssystems von SpectraSensors Inc., USA, Typ WVSS-II.....	15
Abb. 5: Beispiel des Vertikalprofils (T-logP-Diagramm) eines mit Feuchtesensor ausgestatteten Flugzeuges der Lufthansa-Flotte.....	16
Abb. 6: Verteilung der Feuchtemessungen von mehr als 70 Flugzeugen im Lauf von 24 Stunden über den USA.....	16
Abb. 7: AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) auf der Basis des Bord-Boden-Kommunikationssystems ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System).....	19
Abb. 8: AMDAR Report-Erstellung.....	20
Abb. 9: AMDAR-Report-Steuerung im Flugzeug.....	20
Abb. 10: Arbeitsteilung im Datenfluss von E-AMDAR. ....	21
Abb. 11: E-AMDAR-Einzelessungen eines kompletten Tages über Deutschland.....	24
Abb. 12: 24-stündige Überdeckung des EUMETNET-Messgebietes. ....	25
Abb. 13: 24-stündige weltweite Überdeckung des E-AMDAR-Messbetriebes. Die Farbkodierung ist wie in Abb. 12 bezogen auf die Fluggesellschaften.....	25
Abb. 14: Typische Zeitreihe von Hodogrammen, die an einem normal frequentierten Flughafen (Beispiel: Hannover) im Laufe eines Tages von AMDAR erzeugt wird.....	26
Abb. 15: 24-Stunden-Zeitreihe der AMDAR-Hodogrammen, an einem hoch frequentierten Flughafen (Beispiel: Frankfurt).....	26
Abb. 16: Das TAMDAR-Sensor-Modul wird so in der Flugzeugzellenwand montiert, dass die Strömung weitestgehend parallel zur Symmetrieebene der Sonde verläuft.....	29
Abb. 17: Beispiel für Rekonstruktion der Trajektorie: .....	33
Abb. 18: AMDAR-Messungen weltweit, 24 h Zeitraum, 6.2.2013, alle Höhen .....	35
Abb. 19: AMDAR-Messungen weltweit, 24 h, 6.2.2013, 0 bis 5500 m .....	36

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 1: Die Anzahl der in 2013 für AMDAR-Betrieb verfügbaren Flugzeuge und die tägliche Umfang an Einzelessungen aufgetrennt nach DWD, E-AMDAR und weltweit.....	23
--	----







**Deutscher Wetterdienst**

Fachinformationsstelle und Deutsche Meteorologische Bibliothek  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach