

Fachbereich Geowissenschaften

Institut für Meteorologie Institut für Weltraumwissenschaften

Rekonstruktion von Temperatur- und Windinformationen aus Mode-S-Transponderdaten

Bachelorarbeit von Alexander Bütow

Betreuer: Dr. Thomas Ruhtz *Gutachter:* Prof. Jürgen Fischer Dr. Thomas Ruhtz

Danksagung

Ich bedanke mich zunächst bei meinem Betreuer Thomas, der mich bei der Anfertigung der Bachelorarbeit tatkräftig unterstützt und mir die Möglichkeit gegeben hat, dieses Thema nach meinem Wunsch bearbeiten zu können. Deine wertvollen Fachkenntnisse und Hinweise haben mir sehr geholfen. Ebenso bedanke ich mich bei meinem Gutachter Herrn Prof. Jürgen Fischer.

Meiner Mutter Christiane und meiner Schwester Christine spreche ich besonderen Dank aus. Ihr habt mich während des Studiums immer mit gutem Rat zur Seite standen und ward mir eine hilfreiche Stütze. Desweiteren danke ich meinem Studienkollegen Paul, der mir hilfreiche Tipps zu I^AT_EX geben konnte, sowie Patrizia für ihre sehr nützlichen Literaturhinweise.

Zusammenfassung

In der jüngeren Forschung wurde eine Möglichkeit gefunden, die für die Flugraumüberwachung anfallenden Transponderdaten zwischen Flugzeugen und Bodenstationen zur Rekonstruktion der Temperatur und des Windes in der Troposphäre nutzen zu können. Im Gegensatz zu Radiosondenaufstiegen oder dem AMDAR-Programm fallen durch diese Methode keinerlei zusätzliche Kosten an. Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird ein einfacher Empfänger am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin installiert, der aus den ausgesendeten Transpondersignalen meteorologische Datensätze generiert. Diese werden anschließend anhand der TEMP-Daten aus Lindenberg validiert. Die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen, dass sich der Empfangsaufbau für diese Aufgabe eignet und die meteorologische Parameter eingeschränkt mit den TEMP-Daten vergleichbar sind.

Abstract

In recent research a method was found, that utilize air traffic surveillance data between aircraft and air traffic control facilities to derive upper air temperature and wind data. In contrast to soundings and the AMDAR program, no additional expenses are incurred. Within the scope of this bachelor thesis a simple receiver is set up at the Institute of Meteorology of the Free University Berlin, which generates meteorological data sets from transponder signals. This data is validated with TEMP data from Lindenberg. The results of this work illustrate, that the receiver is suitable for this task and the derived meteorological data is comparable with TEMP data within certain limits.

Inhaltsverzeichnis

1	Einl	eitung	5
	1.1	Aerologische Messysteme für die operationelle Wettervorhersage	6
	1.2	Meteorologische Rekonstruktion über Transponderdaten $\ . \ . \ .$	8
2	Gru	ndlagen	9
	2.1	Radar und Transponder	9
	2.2	Datenformate von Transpondersignalen	10
	2.3	Meteorologische Rekonstruktion	12
		2.3.1 Wind	13
		2.3.2 Temperatur	13
		2.3.3 Luftdruck und Geopotential	14
	2.4	Fehlerquellen	15
3	Auf	bau eines Empfängers am Institut	18
	3.1	Software	19
	3.2	Örtliche und zeitliche Verteilung der Daten	20
4	Ver	gleich mit TEMP-Daten aus Lindenberg	23
5	Zus	ammenfassung und Diskussion	26
	5.1	Ausblick	28
6	Que	ellenverzeichnis	29
7	Abk	sürzungsverzeichnis	31
8	Anh	iano ^r	32
•	8 1	Vertikalplot	32
	U • ±		
	8.2	BDS-Register	33
	8.2	BDS-Register	33 33
	8.2	BDS-Register	33 33 35
	8.2	BDS-Register	33 33 35 36
	8.2	BDS-Register	33 33 35 36 37

1 Einleitung

In der Meteorologie stellt die Messung und Assimilation meteorologischer Grundparameter in der dreidimensionalen Atmosphäre nach wie vor eine große Herausforderung dar. Zur Gewährleistung einer stetig verbesserten Vorhersageleistung numerischer Wettermodelle, spielt neben der Erhöhung der räumlichzeitlichen Auflösung und verbesserte Rechenverfahren maßgebliche die korrekte Erfassung des Ausgangszustandes der Atmosphäre eine Schlüsselrolle. Im Gegensatz zu bodengebundenen Messverfahren, die bereits in den Anfängen der Meteorologie Verbreitung fanden, sind aerologische Messungen jedoch mit einem relativ hohen technischen und finanziellen Aufwand verbunden. Seit dem 20. Jhd. werden insbesondere Radiosonden für diesen Zweck eingesetzt, die allerdings allein mit einem Materialpreis von mindestens 150€ (C. DRÜE et al. (2013)) zu buche schlagen und daher höchstens vier mal am Tag an ausgewählten Stationen gestartet werden. Gezielte Messungen mit umfangreicher Sensorik ausgestattete Flugzeuge stellen aufgrund immenser flugbetrieblicher Kosten keine Alternative dar und sind nur für experimentelle Zwecke sinnvoll einsetzbar. Daher ist es von großem Interesse, auf alternative Messverfahren zurückgreifen zu können, die sowohl kostengünstiger sind, als auch eine deutlich höhere Auflösung liefern.

Durch das mittlerweile hohe, weiterhin wachsende Luftverkehrsaufkommen bietet sich die Möglichkeit an, Verkehrsflugzeuge als universelle Instrumententräger im Rahmen ihres gewöhnlichen Betriebs zu nutzen. Variablen wie **Temperatur**, **Luftdruck** bzw. Druckhöhe, **Wind**, Vereisungsgzustand und Position sind elementare Fluggrößen, die die auf außerordentliche Zuverlässigkeit und Robustheit ausgelegte Sensorik eines Verkehrsflugzeuges in hoher Auflösung erfasst. Sie sind eine Untermenge von weiteren Flugparametern und stellen einen sicheren Flugbetrieb und präzise Navigation sicher. Besonders vorteilhaft ist, dass Überprüfung und Kalibrierung im Rahmen zulassungskritischer und strenger Wartungsauflagen ohnehin regelmäßig ausgeführt werden.

Der technische Fortschritt der Kommunikations- und Ortungssystemen zwischen Flugzeug und der verkehrsleitenden Flugsicherung führt mittlerweile weit über die Möglichkeiten des konventionellen Sprechfunks und der Positionsbestimmung durch Radarsysteme hinaus. Sie stellen zwar nach wie vor das Rückgrat der Flugsicherung dar, werden aber durch höherkapazitive, digitale bzw. textbasierte Kommunikationsverfahren ergänzt und langfristig teilweise sogar ersetzt. Diese neuen Verfahren zeichnen sich durch vielseitige Nutzungsmöglichkeiten und stehen in enger Verbindung mit den Datenbussystemen bzw. der Avionik¹ eines Flugzeugs. Zur meteorologischen Datengewinnung für die oben genannten Grundgrößen kann also die gegebene Infrastruktur ohne größere technische Eingriffe genutzt werden. Dies ist eine entscheidende Motivation für Fluggesellschaften und der Flugsicherung ihre Kommunikationskapazitäten zum Zwecke der meteorologischen Datengewinnung zur Verfügung zu stellen, ohne umfangreiche Kosten für Ausrüstung und Betrieb gesonderter Datenerfassungssysteme in Kauf nehmen zu müssen. Zunächst profitieren Wetterdienste durch die nachgewiesene Verbesserung der Vorhersageleistung ihrerseits (S. DE HAAN, A. STOFFELEN (2010) und R. PETERSEN (2012)), die Fluggesellschaften und Flugsicherungen wiederum durch die von den Wetterdiensten verbesserten Produkte, die für die hohen Anforderungen der modernen Zivilluftfahrt notwendig sind (T. HAUF, K. STRUM (2014)).

Diese Arbeit befasst sich mit einer speziellen Variante der Datengewinnung, die den anfallenden Datenverkehr zwischen Verkehrsflugzeugen ("Airliner") und der Flugsicherung nutzt. Sie dient der Luftraumüberwachung und ergänzt konventionelle Radarsysteme (Primärradar) um eine Vielzahl weiterer Informationen (Sekundärradar und ADS-B (Automatic Dependent Surveillance -Broadcast)), wie exakte Geschwindigkeit, GPS-Position, geometrische Höhe oder der navigatorischen Intention der Verkehrsflugzeuge. Nach einer kurzen Vorstellung bereits operationeller Messverfahren (AMDAR - Aircraft Meteorological Data Relay), wird im zweiten Kapitel näher auf die Grundlagen der Datengewinnung mit Hilfe des Sekundärradars eingegangen. Neben einer technischen Beschreibung der Funktionsweise des Sekundärradars, werden einige Datenformate des Radars näher erklärt, die zur Rekonstruktion der Grundgrößen Temperatur, Luftdruck bzw. Geopotential und Wind nutzbar sind. Die dazu nötigen Herleitungen bzw. Rechenverfahren werden anschließend näher beleuchtet. Zudem wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Empfänger am Institut für Meteorologie der Freien Universität aufgebaut, der die über Funk ausgestrahlten Flugsicherungsdaten im Großraum Berlin abfängt und mit Hilfe eines Programms stündliche Datensätze generiert. ein weiterer Schwerpunkt ist die Validierung der rekonstruierten Temperatur- und Winddaten anhand der TEMP-Daten der Station Lindenberg (WMO 10393).

1.1 Aerologische Messysteme für die operationelle Wettervorhersage

Schon ab den 1970'er Jahren konnten Verkehrsflugzeuge mit dem sogenannten ASDAR-System (Aircraft-to-Satellite Data Relay) ausgestattet werden. Das System erfasste die Grundgrößen Temperatur, Druck sowie Wind und

¹Avionik bezeichnet die für den Flugbetrieb notwendigen (elektronischen) Einrichtungen für Navigation, Kommunikation, Sensorik- und Anzeigesysteme.

übermittelte die Daten über einen geostationären Satellitenlink an die Wetterdienste. Ein nachteiliger Aspekt des Systems war jedoch, dass ein eigener Container am Flugzeug montiert werden musste, der sich auf die Betriebskosten des Flugzeugs nachteilig auswirken konnte.

Deutlich erfolgreicher ist dagegen AMDAR, welches sich seit den 1990'ern operationell im Einsatz befindet. In den USA wird es als MDCRS (Meteorological Data Collection and Reporting System) bezeichnet und betrieben. Ermöglicht wurde das System insbesondere durch die Entwicklung des ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System), das zur erweiterten Kommunikation zwischen Flugsicherung und Flugzeug zur Entlastung des Sprechfunks konzipiert wurde. Die Entwicklung startete in den 1970'er Jahren und ist heute international fester Bestandteil moderner Flugsicherungsbetriebe und des Flottenmanagements von Airlines. Über eine eigene Software werden in fest definierbaren Intervallen Datensätze von den Messdaten der Flugsensoren erstellt und ab einer bestimmten Größe über das ACARS an den Netzbetreiber ARINC (Aeronautical Radio Incorporated) direkt über Ultrakurzwelle oder INMARSAT gesendet. Diese Daten stehen wiederum den Wetterdiensten für ihre Anwendungszwecke nach einer umfangreichen Qualitätskontrolle zur Verfügung. Da zur Übermittlung von Nachrichten über ACARS Kosten durch den Netzbetreiber ARINC anfallen, werden innerhalb des europäischen E-AMDAR-Programms über ein Optimierungsverfahren (E-ADOS - E-AMDAR Data Optimazition System) nur bestimmte AMDAR-fähige Flugzeuge der beteiligten Fluggesellschaften aktiviert (getriggert), um eine Überfrachtung an Daten im Hinblick auf eine Kostenbegrenzung zu vermeiden.

Trotz des nachgewiesenen positiven Impakts auf die Vorhersagegüte numerischer Wettermodelle besonders im Kurzfrist- und Nowcastingbereich (R. PE-TERSEN (2012)), fehlt für einen mit Radiosonden vergleichbarer Messumfang die Erfassung der Luftfeuchtigkeit. Luftfahrzeuge messen diese nicht, da sie eine für die Flugdurchführung relativ uninteressante Messgröße darstellen. Oftmals sind sie jedoch mit einem Eisdetektor ausgestattet, der bei Eisansatz am Flugzeug ein Signal an die Avionik weitergibt und künftig in die AMDAR-Meldungen integriert wird (C. DRÜE et al. (2013)). Abhilfe schaffen nachrüstbare Feuchtigkeitssensoren. Innerhalb des E-AMDAR- und MDCRS-Programms wird der WVSS-II-Sensor der Firma SpectraSensors eingesetzt und wurde nach einer Serie ausgiebiger Erprobungen (A. HOFF (2009) und R. PETERSEN et al. (2011)) an ausgewählte Verkehrsmaschinen montiert². Das Verfahren basiert auf der Messung eines infraroten Absorbtionsbandes von Wasserdampf im Bereich von $1,37\mu m$ mit Hilfe einer Laserdiode.

 $^{^2{\}rm Im}$ Jahr 2013 wurden weltweit etwas mehr als 70 Maschinen mit dem Sensor ausgestattet. Quelle: C. DRÜE et al. (2013)



Abb. 1: Schema der Arbeitsbereiche des E-AMDAR-Programms. Die beteiligten Wetterdienste (rosa) erhalten die Daten aus dem AMDAR-Kernprogramm (grün) und den Fluggesellschaften (gelb). Quelle: C. DRÜE et al. (2013).

1.2 Meteorologische Rekonstruktion über Transponderdaten

Als Alternative zum AMDAR-System wurde durch die Arbeiten von S. DE HAAN untersucht, inwiefern die über das sekundäre Radarsystem übermittelten Sensordaten meteorologisch interpretieren lassen. Es konnte gezeigt werden, dass die Qualität der rekonstruierten Windmesswerte mit AMDAR vergleichbar sind. Dies trifft auf die Temperatur nicht zu, da sie indirekt über das Verhältnis zweier Geschwindigkeitsparameter errechnet wird. Die Geschwindigkeitsparameter werden nur mit einer begrenzten numerischen Auflösung übertragen, weshalb besonders in Flugphasen mit relativ geringer Geschwindigkeit (Start und Landung) eine starke Streuung der Temperatur resultiert. Wie auch diese Arbeit zeigt, kann dieses Problem jedoch mit einer großen Zahl an Einzelmessungen gut durch Mittelwertbildung behoben werden. Da die Radardaten fester Bestandteil der Flugsicherung sind und den Flugsicherungsbetreibern zur Verfügung stehen, fallen keine Kosten durch eine zusätzliche Belastung der Dateninfrastruktur wie im Falle des ACARS-Betreibers ARINC an. S. DE HAAN et al. (2013) wie auch diese Arbeit im Folgenden zeigen, dass die Erfassung der Daten des Sekundärradarsystems ebenfalls mit verhältnismäßig kostengünstigen und einfachem Equipment möglich ist.

2 Grundlagen

2.1 Radar und Transponder

Zur Positionsbestimmung von Verkehrsflugzeugen spielt in der Flugsicherung nach wie vor das klassische primäre Radar (Radio Detection and Ranging) eine zentrale Rolle. Mit Hilfe kombinierter Radarsende- und -empfangsgeräte werden gepulste Mikrowellen ausgesendet, welche über die Flugzeugstruktur in verschiedene Raumrichtungen reflektiert werden. Über den Azimut, Höhenwinkel und der Laufzeitdifferenz zwischen einem ausgesendeten und reflektierten Puls kann die Position eines Flugzeuges bestimmt und auf einem Radarschirm für einen Fluglotsen dargestellt werden. Problematisch ist jedoch, dass die entsprechenden Radarsignaturen lediglich verbal über Sprechfunk einem Flugzeug bzw. einer Flugnummer zugeordnet werden können. Zur Vereinfachung der Identifizierung wurde daher bereits in den 1950'er Jahren ein sekundäres Radarsystem unter Schirmherrschaft der ICAO (International Civil Aviation Organization) entwickelt. Bei einem sekundären Radarsystem sendet ein im Flugzeug verbauter Transponder aktiv ein Identifizierungssignal aus, sobald es vom Sendepuls einer Bodenradarstation erfasst wird.

Ein sogenannter Mode-C-Transponder sendet ein von der Flugsicherung freigegebenen Zahlencode aus, der von den Piloten über ein Bedienfeld eingegeben wird und der Flugsicherung zur Identifizierung eines Flugzeugs dient. Im ALT-Modus wird außerdem die aktuelle, von der Flugzeugsensorik erfasst Flughöhe übermittelt. Die Daten werden jeweils in 56bit langen Datenpaketen auf einer Frequenz von 1090MHz ausgesendet. Diese relativ einfachen Transponder werden besonders in Klein- und Leichtflugzeugen, aber auch in kleineren Regionalverkehrsflugzeugen eingesetzt. Mittelgroße bis große Passagierflugzeuge sind dagegen überwiegend mit einem moderneren Mode-S-Transponder ausgestattet. Dieses Transpondersystem um-



Abb. 2: Primär- (a) und Sekundärradarantenne (b) auf dem Deister. Bildquelle: Wikimedia Commons, CC-Lizenz.

fasst die Funktionalitäten des Mode-C, allerdings ist es mit zahlreichen wei-

teren Funktionen zum Datenaustausch zwischen Verkehrsflugzeugen einerseits (Kollisionsvermeidungssystem ACAS) und der am Boden befindlichen Flugsicherungseinrichtungen andererseits ausgestattet. Mode-S-Transponder können außerdem gezielt über eine jeweilige 24bit lange ICAO-Adresse diskret abgefragt werden (Interrogation), wobei das Antwortpaket je nach Typ eine Länge von 56bit oder 112bit (Mode-S EHS (Enhanced Surveillance)) besitzt und ebenfalls auf 1090MHz ausgesendet wird. Die verschiedenen Antwortformate sind im ICAO Annex 10 festgelegt. Üblicherweise werden verschiedene Geschwindigkeitsparameter (Machgeschwindigkeit, Geschwindigkeit über Grund etc.), Kursdaten, die Flughöhe und die Flugnummer abgefragt.

Neben diesem Verbund aus Primär- und Sekundärradar entwickelte die *FAA* im Rahmen ihres *NextGen*-Programms das ADS-B. ADS-B-fähige Transponder senden völlig unabhängig von den Radarsystemen in regelmäßigen Abständen 56bit und 112bit (ADS-B ES (Extended Squitter)) lange Pakete aus, in denen, je nach Format, u.a. die Geschwindigkeit über Grund, Flugnummer, Höhe und Position übermittelt wird. Die Identifizierung des Flugzeugs erfolgt auch hier über eine einmalige 24bit lange Adresse. Mit diesem System kann prinzipiell die vergleichsweise teure und aufwendige Radartechnik zur Positionsbestimmung vollständig ersetzt werden.

2.2 Datenformate von Transpondersignalen

Da die Größe eines Pakets auf maximal 112bit begrenzt ist und unabhängig voneinander stehende Informationen diskret ausgesendet werden, wurden eine große Zahl unterschiedlicher Datenformate definiert, die für die Senderichtung Flugzeug-Boden als **Downlink-Format** (DF) bezeichnet werden. Die für die meteorologische Auswertung notwendigen Formate umfassen drei 112bit lange Hauptformate (DF17 für ADS-B ES, DF20/21 für Mode-S EHS), welche wiederum in mehrere Registertypen (BDS, Binary Data Store) unterteilt werden. In den Mode-S-Transpondern gibt es 256 belegbare 56bit-Register, deren Inhalt zeitkritisch gespeichert werden. Sie sind sind im ICAO-Dokument Doc 9688 definiert³. Die 112bit-Pakete enthalten lediglich einen 56bit langen Datenblock, in denen die Registerinformationen kodiert sind. In den übrigen Bits sind neben der Angabe des entsprechenden Downlink-Formats weitere Kontrollinformationen hinterlegt.

Im Falle von ADS-B ES sind in den ersten 5 Bits das Downlinkformat und in den 3 weiteren Bits die sog. Capabilities (CA) kodiert. Die folgenden 24bit (Bits 9 bis 32) enthalten die ICAO-Adresse des Flugzeugs. Anschließend folgt der 56bit Nachrichtenteil (Bits 33 bis 88), gefolgt vom 24 Paritybits (Bits 89

³Quelle: http://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr17.de.html

bis 112). Beim Mode-S EHS ist in den ersten 5bit ebenfalls das Downlink-Format enthalten, wobei sich 27 Kontrollbits anschließen, die nicht näher bekannt sind. In den nachfolgenden 56bit sind die abgefragten Mode-S-Daten enhalten und werden von 24 Paritybits abgeschlossen, in denen die ICAO-Adresse verschlüsselt ist.



Abb. 3: Blockstruktur der 112bit-Pakete für ADS-B ES und Mode-S EHS.

Bei ADS-B ist das BDS-Register 0,6 (Höhe, Position über Grund) von Interesse, welches etwa sekündlich ausgesendet wird. Zur Erhöhung der Genauigkeit und Datenreduktion sind die Positionsdaten über ein spezielles Verfahren kodiert (CPR - Compact Position Reporting, für Details siehe A. MARSHALL (2009)). Die beiden BDS-Register 5,0 und 6,0 sind dagegen Bestandteil des Mode-S EHS und werden von der Flugsicherung abgefragt. Das Zeitintervall zwischen einzelnen Aussendungen beträgt zwischen 4 und 12 Sekunden und ist von der interrogierenden Bodenstation abhängig. BDS 5,0 enthält die Geschwindigkeit und Richtung des Flugzeugs über Grund, sowie die Fluggeschwindigkeit relativ zur Luft. Zudem ist der aktuelle Rollwinkel des Flugzeugs in diesem Register hinterlegt. BDS 6,0 enthält neben der Vertikalgeschwindigkeit des Flugzeugs Informationen zur angezeigten Fluggeschwindigkeit, die Mach-Geschwindigkeit und den Steuerkurs. Eine Übersicht der nach den BDS-Registern sortierten Höhen-, Geschwindigkeits- und Kursparameter sind in der folgenden Tabelle zusammen mit den in der zivilen Luftfahrt gängigen Akronymen aufgeführt, die in dieser Arbeit häufiger Erwähnung finden werden.

Neben dem BDS 0,5 ist im DF17-Format noch das BDS 0,9 enthalten. In diesem Register sind ebenfalls IAS, GS, TRK, HDG und VS kodiert, wobei diese Größen für eine Rekonstruktion der Temperatur allein nicht hinreichend sind (siehe nächstes Kapitel). Darüber hinaus enthält es die Höhendifferenz zwischen der mit dem bordeigenen Höhenmesser gemessenen barometrischen Höhe im Bezug zur Standardatmosphäre und der geometrischen Höhe, die über GPS-Signale bestimmt wird. Da die barometrische Höhenmessung über ein einfaches statisches Luftdruckmessystem im Flugzeug erfolgt und für die Standardatmosphäre kalibriert ist, kann die barometrisches Höhe direkt in ein Luftdruckmaß umgerechnet werden. Die Vertikalgeschwindigkeit und der Roll-

Rekonstruktion	von	Temperatur-	und	Windinformationen	aus
Mode-S-Transponderdaten					

BDS	Inhalt	engl. Bez.	Akronym
0,5	globale Position	position	-
	barometrische Höhe	barometric altitude	ALT
5,0	Rollwinkel	roll angle	-
	tatsächliche Flugrichtung	track	TRK
	Geschwindigkeit über Grund	ground speed	GS
	Änderungsrate des tracks	track angle rate	-
	wahre Fluggeschwindigkeit	true airspeed	TAS
6,0	Steuerkurs angezeigte Fluggeschw. Mach-Zahl barometrische Vertikalgeschw. intertiale Vertikalgeschw.	heading indicated airspeed Mach number barometric altitude rate inertial vertical velocity	HDG IAS M VS

Tab. 1: Für die meteorologische Auswertung relevanten BDS-Register mit entsprechendem Inhalt und gängigen Akronymen. BDS 0,9 wurde wegen des umfangreichen Inhalts nicht aufgeführt.

winkel des Flugzeugs ist für die Rekonstruktion zwar nicht erforderlich, beeinflussen allerdings Qualität Geschwindigkeitsdaten (C. DRÜE ET AL. (2008)) und sollten daher zur Qualitätskontrolle bzw. Datenfilterung der rekonstruierten Größen berücksichtigt werden. Die exakte Übersicht aller in den BDS-Registern kodierten Informationen sind im Anhang einsehbar.

Problematisch ist, dass sich die BDS-Register der Mode-S-Daten nur über eine Reihe von gesetzten Statusbits an verschiedenen Positionen innerhalb des Datenblocks identifizieren lassen. Die Statusbits eines bestimmten BDS-Registers können jedoch zufällig mit Einsen belegt sein, die dem Inhalt anderer Register zugehörig sind. Eine eindeutige Identifizierung der BDS-Register ist also nicht möglich. Seitens der Flugsicherung besteht dieses Problem nicht, da die interrogierende Bodenstation "weiß", welche Datenregister vom Flugzeug gesendet werden sollen. Bei den ADS-B-Daten ist dagegen eine eindeutige Identifizierung der BDS-Register über die im Datenblock hinterlegten Type Codes (TC) möglich. Dieser gibt u.a. an, wie genau der übermittelte Positionswert ist und welche Informationen im Datenblock verschlüsselt sind.

2.3 Meteorologische Rekonstruktion

Dank der umfangreichen Parameter, die die zahlreichen Datenformate der Transponder liefern, ist die Rekonstruktion einer Reihe von meteorologisch interessanten Größen möglich. Es kann sowohl der am Flugzeug herrschende, momentane Wind, als auch die Lufttemperatur approximiert und einer Position im dreidimensionalen Raum zugeordnet werden (ADS-B-Positionsdaten). Darüber hinaus wird im BDS-Register 0,9 (DF17, ADS-B) auch die Differenz zur geometrischen Höhe übermittelt, wodurch die Bestimmung der Höhe bzw. des Geopotentials einer beliebigen Druckfläche ermöglicht wird.

2.3.1 Wind

Der Wind lässt sich einfach aus der horizontalen Vektordifferenz der Trajektorie des Flugzeugs bezüglich des Bodens, folgend als $\vec{v_g}$ bezeichnet, und der umgebenen Luft $\vec{v_a}$ bilden:

$$\vec{v_w} = \vec{v_g} - \vec{v_a} \tag{1}$$

Zur Bildung der beiden Vektoren sind jeweils zwei Variablen nötig, welche aus den Mode-S-Daten bezogen werden können. Für $\vec{v_g}$ sind dies GS und TRK, $\vec{v_a}$ wird dagegen aus TAS und HDG gebildet.

2.3.2 Temperatur

Als Ausgangspunkt der Temperaturberechnung dient die Definition der Schallgeschwindigkeit c_s im idealen Gas, die definiert ist durch:

$$c_s = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} \tag{2}$$

Mit κ als Adiabatenkoeffizient, dem Druck p und der Dichte ρ . Setzt man für p nun die ideale Gasgleichung:

$$p = \rho RT \tag{3}$$

ein, ergibt sich für c_s :

$$\Rightarrow c_s = \sqrt{\kappa RT} \tag{4}$$

Wobei R die Gaskonstante des idealen Gases und T die Temperatur ist. κ und R bleiben unter troposphärischen Bedingungen nahezu konstante Größen, wodurch sich näherungsweise eine reine Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit ergibt.

Da in den Mode-S-Daten die Mach-Zahl übermittelt wird und wie folgt definiert ist,:

$$M = \frac{v_{tas}}{c_s} \tag{5}$$

kann zusammen mit (4) ein Zusammenhang aus der übermittelten wahren Fluggeschwindigkeit TAS (= v_{tas}) und der Mach-Zahl M zur Temperatur hergestellt werden:

$$\Rightarrow T = \frac{1}{\kappa R_d} \left(\frac{v_{tas}}{M}\right)^2 \tag{6}$$

Wobei R_d die spezifische Gaskonstante für trockene Luft ist.

2.3.3 Luftdruck und Geopotential

Flugzeuge bestimmen ihre Höhe mit Hilfe eines Höhenmessers, der auf die Messung des statischen Umgebungsdrucks basiert und für die internationale Standardatmosphäre (ISA) kalibriert ist⁴. Je nach Abweichung des atmosphärischen Drucks oder der Temperatur von der Standardatmosphäre kann der übermittelte Höhenmesswert erheblich von der wahren geometrischen Höhe des Flugzeugs abweichen. In relativ niedrigen Flughöhen⁵ werden die Höhenmesser zwar auf den lokalen Luftdruck eingestellt, jedoch wird im BDS 0,5 stets der ISA-kalibrierte Höhenmesswert übertragen. Die wahre geometrische Höhe h_g berechnet sich wiederum einfach aus dem im BDS 0,9 hinterlegten Differenzwert zwischen der geometrischen (bestimmt über GPS) h_{diff} und gemessenen barometrischen Höhe h_{alt} :

$$h_{geo} = h_{alt} - h_{diff} \tag{7}$$

Eine Verknüpfung der (gemessenen) Höhe mit dem Luftdruck kann recht einfach über die barometrische Höhenformel hergestellt werden, die ebenfalls zur Modellierung der Standardatmosphäre benutzt wird. Ausgangspunkt ist die hydrostatische Grundgleichung mit dem Gesetz des idealen Gases, hier für trockene Luft in integraler Form:

$$\int \frac{1}{p} dp = -\int \frac{g}{R_d T} dh \tag{8}$$

Mit p für den atmosphärischen Druck, g als konstant angenommene Gravitationsbeschleunigung und T, die mittlere Temperatur der Schicht, über die integriert wird. Da in der Standardatmosphäre ein konstanter vertikaler Temperaturgradient von -6,5K/km bis zu einer Höhe von genau 11km angenommen wird, kann die Temperatur als folgende Funktion dargestellt werden:

$$T(h) = T_0 + \Gamma_s(h - h_0)$$
(9)

 T_0 ist die Temperatur auf der Referenzhöhe h_0 und Γ_s der Temperaturgradient. Eingesetzt in 8 ergibt sich für p schließlich:

$$p(h) = p_0 \left(1 - \frac{\Gamma_s h}{T_0}\right)^{\frac{g}{R_d \Gamma_s}} \tag{10}$$

 $^{^4\}mathrm{Diese}$ lassen sich jedoch jederzeit manuell an den aktuell herrschenden reduzierten Luftdruck anpassen.

 $^{^5 \}mathrm{in}$ Deutschland unterhalb von 5000ft üNN (ca. 1500m).

Mit $h_0=0$ m als Referenzhöhe. p_0 ist mit 1013,25hPa und T_0 mit 288,15K (=15°C) festgelegt.

Zwischen 11km und 20km Höhe wird in der Standardatmosphäre dagegen von einer konstanten Temperatur von $T_r=216,65$ K (=-56,5°C) ausgegangen. Die barometrische Höhenformel vereinfacht sich für diesen Fall:

$$p(h) = p(h_r)exp\left(\frac{-g(h-h_r)}{R_dT_r}\right)$$
(11)

 h_r ist hierbei die Referenzhöhe (11km). Der Referenzdruckwert wird in dieser Höhe rechnerisch mit ca. 226,3hPa beziffert.

Das Geopotential einer beliebigen Druckfläche p errechnet sich wie folgt:

$$\Phi = \int_{0}^{h(p)} gdz \tag{12}$$

Zur Vereinfachung kann g für die gesamte Troposphäre und untere Stratosphäre als konstant angenommen werden⁶.

2.4 Fehlerquellen

Neben zufälligen und systematischen Messfehlern durch die Flugzeugsensorik, ist besonders das Rekonstruktionsverfahren für die Temperatur aufgrund der begrenzten Auflösung der Machgeschwindigkeit von 0,004 ($\approx 2,7$ kt unter ISA-Bedingungen auf Meeresniveau) relativ ungenau. Wie im Auswertungsteil ersichtlich wird, folgt daraus eine erhebliche Variabilität der Einzelmesswerte, wobei eine hohe Genauigkeit durch eine Vielzahl von Messungen sehr gut wiederhergestellt werden kann. Da die Temperatur aus dem quadrierten Quotienten von M und TAS gebildet wird, steigt die Variabilität bei geringen Geschwindigkeiten sehr stark an. Dieses Problem tritt also besonders während der Start- und Landephase in geringen Höhen auf.

Größe	Auflösung/Einheit
Position (lat., lon.)	$\thickapprox 5 \cdot 10^{-5}$ °
ALT	$25 \mathrm{ft}$
TRK, HDG	$\thickapprox 0.1758^{\circ}$
GS, TAS	$1 \mathrm{kt}$
М	0,004

Tab. 2: Einheiten und Auflösung der Datenfelder für die meteo. Rekonstrukti-
on.

 $^{^6\}mathrm{Für}$ eine Höhe von 13km ergibt sich lediglich ein Fehler von ca.0,2%für das Geopotential.

Der Standardfehler für die Temperatur kann über den GAUSS'schen Fehlerfortpflanzungssatz auf die Approximationsformel für die Temperatur (6) abgeschätzt werden:

$$\Delta T = \frac{\partial}{\partial v_{tas}} T(v_{tas}, M) \Delta v_{tas} + \frac{\partial}{\partial M} T(v_{tas}, M) \Delta M$$
$$\Rightarrow \Delta T = \frac{2}{\kappa R} \left(M^{-2} v_{tas} \Delta v_{tas} + M^{-3} v_{tas}^2 \Delta M \right)$$
(13)



Approximierte Standardabweichung der Temperatur

Abb. 4: Erwartete Standardfehler der rekonstruierten Temperatur über verschiedene Fluggeschwindigkeiten, Temperaturen und angenommene Eingangsfehler. Der An- und Abflugverkehrs bewegt sich im blau markierten Geschwindigkeitsbereich (130kt-250kt), der Flugverkehr auf Reiseflughöhe ungefähr im roten (415kt-475kt).

In Abb. 4 sind die über 13 errechneten Standardabweichungen dargestellt, wobei für ΔTAS und ΔM der kleinste Auflösungswert (schwarze Linien) und die Hälfte derselben (rote Linien) gewählt wurde. Besonders für geringe Geschwindigkeiten und hohe Temperaturen steigen die Fehlerwerte drastisch an und gehen für $v_{tas} = 0$ gegen unendlich. Im Vergleich mit den in der Literatur und im Kapitel 4 festgestellten Abweichungen erscheinen die auflösungsbedingten Fehler von $\Delta M = 0,004$ und $\Delta T = 1kt$ deutlich zu hoch, weshalb für eine realistische Schätzung die Hälfte der Eingangsfehler angenommen werden kann. Für die unteren Höhenbereiche sind also Fehler im Bereich von 5 - 8K, für den Reiseflugbereich 2K zu erwarten. Aufgrund der auflösungsbedingten Varianz der Einzelmessungen können zufällige Messfehler durch die Flugzeugsensoren vernachlässigt werden. Neben unbekannten Drifteffekten unterliegen Geschwindigkeits- und Temperaturmessungen systematische Abweichungen durch den Anstellwinkel bzw. Anströmrichtung der Luft. Erhöhte Anstellwinkel kommen besonders bei Flugphasen mit verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten, im Kurvenflug oder bei Turbulenzen vor. Zur Qualitätskontrolle der Daten wird daher der im BDS-Register 5,0 hinterlegte Rollwinkel berücksichtigt.

Die Auflösung der Daten spielt bei den Windmessungen eine geringere Rolle. Als Fehlerquellen kommen hingegen die Kursdaten selbst in Frage, die den bordseitigen Navigationscomputern bzw. Trägheitsnavigationssystemen entstammen. Der TRK-Wert ist üblicherweise sehr akurat, da die geografischen Pole als Referenzpunkte dienen. Im Gegensatz dazu wird das Erdmagnetfeld als Referenz für den Steuerkurs (HDG) verwendet. Die Messung des Magnetfeldes unterliegt vielen Fehlerquellen, weshalb der magnetische Steuerkurs in modernen Verkehrsflugzeugen über Lookup-Tabellen in den Navigationscomputern bestimmt wird und systematische Abweichungen bedingt. S. DE HAAN (2009) konnte typische Abweichungen von ca. 0-2° über ein Korrekturverfahren landender Flugzeuge nachweisen, wobei diese Werte für jedes Flugzeug individuell ausfallen und abhängig vom Flugzeugtyp streuen.

3 Aufbau eines Empfängers am Institut

Die mit einer Frequenz von 1090MHz omnidirektional ausgestrahlten und per PPM (Puls-Pausen-Modulation) modulierten Transpondersignale sind mit relativ simplen Mitteln empfangbar. Unter Luftfahrtenthusiasten erfreut sich besonders das Dekodieren und Darstellen von ADS-B-Signalen ("Radarspotting") großer Beliebtheit, weshalb sich neben kostengünstigen, semiprofessionellen Spezialempfängern und Antennen auch eine Reihe leistungsfähiger Dekodiersoftware etabliert hat. Besonders verbreitet ist der Einsatz von preiswerten DVB-T-Sticks⁷, die sich in Verbindung mit einem Rechner als universelle Breitbandemfpänger auf Softwarebasis (SDR - Software Defined Radio) nutzen lassen. Beim Einrichten einfacher Empfangsanlagen kann mit verhältnismäßig geringen Aufwand auf gut dokumentierte, freie Software zurückgegriffen werden.



Abb. 5: Raspberry Pi mit DVB-T-Stick.

Abb. 6: Kollinearantenne auf dem Windmessturm.

Als Empfänger dient ein solcher DVB-T-Stick, der über eine USB-Schnittstelle mit einem Einplatinenrechner ("Raspberry Pi") verbunden ist. Stick und Rechner werden in dieser Kombination als SDR betrieben und sind lediglich für die Demodulation der Funksignale in Bit-Strings zuständig. Es wurde eine einfache $\lambda/2$ -Kollinearantenne mit 8 Segmenten aus Koaxialkabel konstruiert

 $^{^7\}mathrm{Ausgestattet}$ mit einem Realtek $\mathrm{RTL2832U}$ Dekoderchip.

und für den Empfang auf 1090MHz optimiert. Mit diesem Aufbau wird eine Empfangsreichweite von gewöhnlich 150-180km erzielt, dennoch stellt sich die Antennenkonstruktion als verhältnismäßig leistungsschwach heraus. Es wird daher in Erwägung gezogen, die Antenne zu einem späteren Zeitpunkt durch ein geeigneteres, kommerzielles Modell zu ersetzen.

Die Geräte wurden am 4. Dezember 2014 auf dem Windmessturm des meteorologischen Instituts der Freien Universität Berlin zunächst provisorisch installiert. Zuvor wurde bereits die dazu nötige Software geschrieben, eingerichtet und zusammen mit der Hardware getestet.

3.1 Software

Im gesamten Prozess - von der Demodulation bis zur Archivierung der meteorologischen Größen - kommen verschiedene Programme zum Einsatz, die für ihre jeweilige Aufgabe spezialisiert sind. Empfangsseitig wird die freie Software dump1090-mutability unter Linux eingesetzt, die die empfangenen und durch den Stick digitalisierten Signale in 56bit bzw. 112bit lange Strings umwandelt. Darüber hinaus führt sie eine Paritätsprüfung durch. Zwar wurde diese Software für die direkte Dekodierung und Darstellung von Transpondersignalen geschrieben, allerdings werden diese in den Ausgabeformaten nur in unzureichendem Maße zum Zwecke des Radarspottings entschlüsselt. Die für die Auswertung relevanten Registerinformationen müssen daher über eigene Routinen dekodiert werden. Da die Rechenkapazität des Raspberry Pi's stark eingeschränkt ist, erfolgt die Dekodierung auf dem leistungsstarken Rechnercluster des Instituts ("david1-Server") über eine Reihe modularer Routinen in der Programmiersprache R. Dazu werden die in stündliche Datensätze zusammengefassten und mit einem Zeitstempel versehenden Bit-Strings automatisch in die Auswertungssoftware eingelesen, welche die DF17- und DF20/21-Pakete entschlüsselt. Da die Art des übermittelten BDS-Registers eines DF20/21-Pakets nicht eindeutig angegeben wird, müssen zur Gewährleistung einer sicheren Identifizierung eine Reihe von Bedingungen erfüllt werden. Zunächst wird geprüft, ob die jeweiligen Statusbits der Register 5,0 (Bits 1, 12, 24, 35 und 46 im Datenblock) und 6,0 (Bits 1, 13, 24, 35 und 46) mit Einsen gesetzt sind. An diesen Bitstellen können jedoch zufällig Einsen der Datenfelder einer anderen Registerart stehen, wodurch es vorkommen kann, dass ein DF20/21-Paket beiden gesuchten Registern zugeordnet wird. In diesem Fall wird das Paket verworfen. Sind die Statusbits nur eines der beiden BDS-Register belegt, wird das Paket dekodiert und die Datenfelder individuell auf Plausibilität überprüft (Vgl Tab. 3). Fällt nur ein Datenfeld durch die Prüfung, wird das Paket ebenfalls verworfen.

BDS	Bedingung
5,0	$\begin{array}{l} 150 \mathrm{kt} < \mathrm{GS} < 550 \mathrm{kt} \\ 120 \mathrm{kt} < \mathrm{TAS} < 500 \mathrm{kt} \\ \ \mathrm{GS} - \mathrm{TAS} \ < 200 \mathrm{kt} \\ \mathrm{roll} < 30^\circ \end{array}$
6,0	120kt < KIAS < 380kt 0.2 < M < 0.9

Tab. 3: Plausibilitätsprüfung für die Datenfelder der BDS-Register 5,0 und 6,0.

Zur Generierung eines Messpunktes werden schließlich Quartette aus den dekodierten BDS-Registern der DF17- und DF20/21-Pakete gebildet, die jeweils einer ICAO-Adresse zugeordnet werden können und zeitlich nicht länger als 1s auseinander liegen. Der Inhalt der dekodierten Register wird gemäß der Formeln (1) für den Wind, (6) für die Temperatur und (10) sowie (11) für den Luftdruck umgerechnet. Vor der Windberechnung muss der magnetische HDG-Wert um die magnetische Deklination korrigiert werden.⁸ Zur Vermeidung weiterer möglicher Dekodierungsfehler wird die berechnete Temperatur (-80°C < T < 50°C) und die Windgeschwindigkeit (≤ 200 kt) geprüft. Darüber hinaus werden die rekonstruierten Daten in Form operationeller Vertikalplots dargestellt (vgl. Abb. 17). Parallel dazu werden über den GDS-Server des Deutschen Wetterdienstes die TEMP-Daten der Station Lindenberg (WMO 10393) bezogen, über ein Programm in R entschlüsselt und ebenfalls auf dem david1-Server gespeichtert.



Abb. 7: Datenverarbeitungskette.

3.2 Örtliche und zeitliche Verteilung der Daten

Da sich die aufgebaute Station unmittelbar zwischen den Flughäfen Berlin-Tegel (Entfernung ca. 11km, ICAO-Kennung: EDDT) und Berlin-Schönefeld (ca. 16km, EDDB) befindet, können besonders aus den unteren Teilen der Troposphäre große Datenmengen extrahiert werden, die sich auf einem verhältnismäßig kleinen Raum konzentrieren. Der an- und abfliegende Verkehr wird unmittel-

⁸Es wird ein konstanter Deklinationswert von +3.3° angenommen. Quelle: http://www.gfz-potsdam.de/deklinationsrechner/, Stand: Oktober 2014

bar kurz vor der Landung bzw. nach dem Start ab einer Höhe von wenigen Hundert Metern von Mode-S-Radaren interrogiert. Bis zu den üblichen Reiseflughöhen im Bereich von 9 bis 13km können Daten gewonnen werden. Der Verkehr auf den Reiseflughöhen ist jedoch auf äquidistanten Flugflächen (FL - flight level⁹) vertikal um 1000ft (305m) voneinander getrennt, auf denen sich die Messpunkte stark konzentrieren. In Flughafennähe ist dagegen eine besonders starke Verdichtung des Flugverkehrs in kleinen Höhen zu beobachten. Es ergibt sich also eine horizontal und vertikal sehr unterschiedliche Verteilung der Messpunkte (Vgl. Abb. 10 und Abb. 9). Dieser Umstand wird durch die relativ schlechte Empfangsqualität der Antenne des verwendeten Aufbaus verstärkt. Wie Abb. 9 zeigt, hängt die Empfindlichkeit der Antenne stark vom Azimutwinkel ab, was für eine vertikal ausgerichtete $\lambda/2$ -Kollinear- bzw. Dipolantenne untypisch ist. Von den westlichen Richtungen zwischen 260° und 290° abgesehen, können Abschattungseffekte aufgrund der äußerst exponierten Lage der Antenne auf dem Windmessturm ausgeschlossen werden.

Für eine möglichst ortsgebundene, vertikale Abdeckung mit Messdaten, die sich für einen Vergleich mit den TEMP-Daten der naheliegenden Station Lindenberg (WMO 10393) eignen, wird eine geeignete Gitterbox um Berlin definiert (51,5°-53,5°N, 12-15°E). Aufgrund der kleinen Steigund Sinkwinkel legt der Flugverkehr horizontal große Strecken zurück, bis die Reiseflughöhen erreicht oder verlassen werden, was eine trichterartige Verteilung der Messpunkte zur Folge hat. Die Größe der Gitterbox ist gerade groß genug gewählt, sodass die Reiseflughöhen vom Großteil des abfliegenden Verkehrs innerhalb der Box erreicht werden. Dies geht jedoch

Verlauf der mittleren stündlichen Datenmenge



Abb. 8: Stündlich anfallende Datenmengen. Farbig markiert sind die Durchschnittswerte für die jeweils angegebenen Zeitspannen.

zu lasten einer hohen horizontalen Auflösung, wodurch bereits mesoskalige Wettersysteme nicht aufgelöst werden können.

Der Flugverkehr unterliegt aufgrund von Nachtflugverboten einem ausgeprägten Tag-Nacht-Zyklus, weshalb der Umfang der stündlichen Datensätze sehr ungleichmäßig ausfällt. Von vereinzelten Flügen abgesehen, herrscht am Flughafen Tegel ein allgemeines Nachtflugverbot. Dies trifft für den Flughafen Schönefeld zwar nicht zu, dennoch wird dieser nachts erheblich seltener fre-

 $^{^9\}mathrm{FL350}$ entspricht z.B. eine Höhe von 35000ft



Abb. 9: Horizontale Verteilung der Messpunkte.

Abb. 10: Zonale Vertikalverteilung der Messpunkte.

quentiert. Dies führt dazu, dass nachts besonders in niedrigen Höhen kaum bis keine Messpunkte gewonnen werden können.

4 Vergleich mit TEMP-Daten aus Lindenberg

Zur Validierung der gewonnen Messwerte werden die TEMP-Daten aus Lindenberg (ca. 60km südöstlich von Berlin) zwischen dem 17. und 28. Februar 2015 herangezogen, die zu den Hauptterminen 0z, 6z, 12z und 18z zur Verfügung stehen. Es werden Standarddruckflächen betrachtet, die in den TEMP-Meldungen als sog. "mandatory pressure levels" bezeichnet und im Gegensatz zu den "significant levels" standardmäßig gemeldet werden und die geopotentielle Höhe enthalten. Konkret wurden die Niveaus 925hPa, 850hPa, 700hPa, 400hPa, 500hPa und 300hPa selektiert.

Es werden die innerhalb der 2*3-Gitterbox (Vgl. Abb. 9) befindlichen Mode-S-Daten ausgewählt und jene Messpunkte herausgefiltert, bei denen die Flugzeuge einen Rollwinkel größer 3° aufweisen. Da die Höhenmesser der Flugzeuge nach der Standardatmosphäre kalibriert sind, korrespondieren die Standarddrucklevel mit den in Tab. 4 angegebenen barometrischen Höhenmesswerten (ALT). Zur Einbeziehung möglichst vieler Messpunkte zur Mittelwertbildung, werden um diese Höhenwerte ± 250 ft/76m starke Schichten definiert. Da unter Umständen nur wenig Messwerte innerhalb einer Schicht vorhanden sein können und diese relativ starken Variationen unterliegen, werden zur Bildung eines Mittels mindestens 20 Messwerte vorausgesetzt. Zur Eliminierung von Ausreißern sind die Messwertgruppen am 5. und 95. Perzentil gestutzt.

		Roho	laten	Mit	ttel
Level	ALT	Temp	Wind	Temp	Wind
300hPa	30065 ft/9164 m	866	930	87	93
400hPa	23574 ft/7185 m	739	814	30	33
500 hPa	18289 ft/5574 m	1493	1634	43	47
700 h Pa	9882 ft/3012 m	3432	3735	90	98
850 hPa	4781 ft / 1457 m	4040	4358	104	112
925hPa	$2500 \mathrm{ft}/762 \mathrm{m}$	8745	9598	194	213
gesamt		19315	21069	101	110

Tab. 4: Für den TEMP-Vergleich zur Verfügung stehende Rohdatenmengen und durschnittliche Anzahl von Rohdaten eines Mittelwertes für die jeweiligen Drucklevel.

In Abb. 11 und 12 sind die gemittelten Stundenwerte der Mode-S-Daten gegen die TEMP-Daten dargestellt. Besonders bei den höheren Temperaturwerten, die in den niedrigeren Höhenbereichen gemessen werden, zeigt sich eine deutlich stärkere Streuung der Einzelmesswerte. Starke Ausreißer wie jene im Bereich um -20°C bis -40°C sind auf Messungen von vereinzelten Flugzeugen zurückzuführen, deren Messwerte einem signifikanten Bias unterliegen. Als Ursache kommen systematische Fehler der Flugzeugsenordaten einerseits oder kleinskalige Wetterphänomene (Schauerstaffel, Front usw.) andererseits in Frage. Der gesamte Bias liegt bei +0,45K, wobei die mittlere Standardabweichung der gemittelten Stundenwerte der Temperatur zu den TEMP-Daten 1,27K beträgt. Werden die gemittelten Größen mit einem Differenzwert größer als 3K zu den TEMP-Daten vernachlässigt, verbessert sich der Bias auf +0,35K bzw. die mittlere Standardabweichung auf 0,95K. Die einzelnen Mittelwerte der Temperatur besitzen eine mittlere Standardabweichung von 1,60K und liegen damit unter den in Kapitel 2.4 abgeschätzten Fehlerwerten.



Abb. 11: Mode-S- vs. TEMP-Temperatur

Abb. 12: Mode-S- vs. TEMP-Temperatur im Detail.



Abb. 13: Mittlere Abweichung und Bias der Mode-S Temperaturmittel.

Für den Wind (Vgl. Abb. 14) fällt der Bias für die jeweiligen Komponenten mit 0,54m/s in zonaler und -0,97m/s in meridionaler Richtung gering aus. In Polarkoordinaten entspricht das einem Windgeschwindigkeitsbetrag von 1,11m/s aus 330°. Im Gegensatz dazu erreichen die Standardabweichungen recht hohe Werte. Die Standardabweichungen der u- und v-Komponenten gegenüber den TEMP-Messungen betragen 3,27m/s und 5,37m/s. Die gemittelten Werte untereinander weisen eine mittlere Standardabweichung von 1,88m/s bzw. 2,33m/s auf. Zumindest in den unteren Höhenstufen (unterhalb von ca. 925hPa) variieren die Windmessungen deutlich weniger (Vgl. Abb. 17 im Anhang). Dies ist im Wesentlichen auf die starke Ortsbeschränkung dieser Messpunkte auf den unmittelbaren Berliner Großraum zurückführbar.



Abb. 14: Scatterplot für X- und Y-Komponenten des Windes.



Differenz Mode-S u-Windmittel gegen TEMP

Abb. 15: Mittlere Abweichung und Bias der Mode-S u-Windmittel.

Differenz Mode-S v-Windmittel gegen TEMP 12 ω Differenz (m/s) 0 4 ထု -12 -20 -10 0 10 20 30 -30 Windgeschwindigkeit(m/s)

Abb. 16: Mittlere Abweichung und Bias der Mode-S v-Windmittel.

5 Zusammenfassung und Diskussion

In dieser Arbeit wird gezeigt, wie aus Flugsicherungsdaten die meteorologischen Größen Lufttemperatur, Wind und Luftdruck bzw. Geopotential rekonstruierbar sind und wie diese mit dem Einsatz einfacher technischer Mittel gewonnen werden können. Die Qualität der Temperatur- und Winddaten wird anschließend anhand der TEMP-Messwerte der naheliegenden Station Lindenberg (WMO 10393) validiert. Das primäre Ziel ist die Einrichtung einer Empfangsanlage und die Erstellung von Dekodierungsroutinen zur operationellen Datengewinnung- und Verarbeitung, wobei die Validierung dersselben ein zweiter Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt. Es wird überprüft, ob sich die implementierten Algorithmen für eine ausreichende Datenqualität im Hinblick auf die Vergleichbarkeit mit TEMP-Daten eignen.

Zunächst lässt sich feststellen, dass sich der Empfangsaufbau hardwareseitig als durchaus geeignet erweist. Trotz der relativ geringen Reichweite bzw. schlechten Empfangscharakteristik der Antenne, ist die anfallende Menge an Transponderdaten als Ausgangspunkt zur Bildung einfacher stündlicher Mittel ausreichend. Tagsüber sind pro Stunde 5000 bis 15000 Datenpunkte über den gesamten Empfangsradius generierbar. Da sich der Verkehr trichterförmig auf den Berliner Großraum konzentriert, können die meisten Daten in den niedrigen Höhen empfangen werden. Dies ist im Hinblick auf die starke Varianz der Temperaturwerte besonders wichtig für wenig streuende Mittelwerte. Zu dünn ist jedoch die Datendichte Im Bereich von 500hPa bis 300hPa, also knapp unterhalb der üblichen Reiseflughöhen. Dies kann durch eine Reichweitenerhöhung mit Hilfe einer besseren Antenne einfach kompensiert werden. Einfach umsetzbar ist ebenfalls der Einsatz eines zweiten Sticks zur Erhöhung der Anzahl empfangener Signale. Durch die hohe Datendichte sind auch kürzere Zeitabstände zur Mittelung möglich (z.B. 15 minütige Auflösung).

Die eingesetzte Software bzw. die Dekodierungsscripte in R laufen stabil und bugfrei, jedoch ist die Performance bei der Dekodierung der DF17-Pakete verbesserungswürdig. Dies liegt vorallem an der relativ umständlichen Kodierung der Position (CPR).

Wie der im Kapitel 4 vorgestellte Vergleich der Mode-S-Daten mit den TEMP-Daten aus Lindenberg zeigt, ist besonders das Approximationsverfahren für die Temperatur trotz der hohen Varianz der Einzelmessungen genau. Zwingende Voraussetzung für einen soliden Mittelwert ist jedoch, dass eine große Zahl an Einzelmessungen für die Bildung einfacher arithmetischer Mittel zur Verfügung stehen. Es zeigte sich, dass die abgeschätzten Fehler (Vgl Kap. 2.4) für die Temperatur deutlich höher ausfallen, als in den Daten zu beobachten ist. Der beobachtete Bias beträgt ca. 0,45K, was sich gut mit der in der Literatur (S. DE HAAN (2009)) beobachteten Werte von ca. 0,2-0,4K deckt. Die vereinzelten Ausreißer sollten genauer untersucht werden. Hier kommen Biasbzw. Drifteffekte einzelner Flugzeuge oder sehr kleinskalige Wetterphänomene (Schauerstaffeln etc.) als Ursache in Frage.

Im Gegensatz zur Temperatur konnte für den Wind eine deutlich höhere Varianz der Einzelmesswerte selbst und der Mittelwerte im Vergleich zu den TEMP-Daten festgestellt werden. Einerseits liegt dies mit hoher Wahrscheinlichkeit an den besprochenen Problemen zur Korrektur der magnetischen Deklination der HDG-Werte, andererseits an der Größe der gewählten Gitterbox. Bereits ein scharfer, kurzwelliger Trog, dessen Passage mit einem signifikanten Windsprung einhergehen kann, fällt in den subskaligen Bereich. Trotzdem stimmt der überwiegende Teil der Mittelwerte passabel mit den TEMP-Werten überein, ist aber mit einem Standardfehler von 4m/s bis 5m/s verbesserungsbedürftig. Die Rohdaten weisen gegenüber den Mittelwerten dagegen eine Standardabweichung von weniger als 2,3m/s auf. Eine weitere Verbesserung der Genauigkeit kann durch ein positionsbasierte Deklinationskorrektur erreicht werden, der in den hier vorgestellten Datensätzen mit 3,3° als konstant angenommen wurde.

Das Problem kleinskaliger Wetterphänomene schlägt sich oft gut sichtbar in den operationellen Vertikalplots nieder. Bei der Passage von Fronten- oder Schauerstaffeln bewirkt dies eine Bimodalverteilung für die bodennahen, auf dem Großraum Berlin begrenzten Messpunkte. Eine Verkleinerung der Gitterbox würde die Variabilität reduzieren, allerdings geht dies zu lasten einer hinreichenden Datendichte in den mittelhohen bis hohen Höhenbereichen unterhalb der typischen Reiseflughöhen.

5.1 Ausblick

In absehbarer Zukunft wird der provisorische Empfangsaufbau durch verbessertes Equipment aufgewertet. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Austausch der Antenne durch ein kommerzielles Modell. Gleichzeitig dazu sollte die Performance der Dekodierungsalgorithmen überarbeitet werden. Zur Generierung der stündlichen Datensätze benötigt der david1-Server mit dem derzeitigen Aufbau ca. 5-12min.

Mit dem vorgestellten technischen Aufbau könnten künftig MRAR-Meldungen (Meteorological Routine Air Report, BDS 4,4) entschlüsselt werden. In diesem Register wird die Lufttemperatur und der Wind direkt übertragen. Zudem enthält es einen Platzhalter für die Meldung der relativen Feuchte, die derzeit jedoch nur im Rahmen des AMDAR-Programms gemessen wird. In den Arbeiten von B. STRAJNAR (2012) und S. DE HAAN (2014) sind MRAR-Daten bereits untersucht worden und erwiesen sich als qualitativ hochwertiger als das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren. S. DE HAAN (2014) konnte z.B. eine Halbierung der Standardabweichung der Temperatur unterhalb von ca. 800hPa nachweisen.

Das Abfragen des Registers BDS 4,4 wird allerdings nicht an allen Radarstandorten durchgeführt. Desweiteren übertragen nur ein kleiner Teil der Verkehrsflugzeuge aufgrund der dazu nötigen Transponderkonfiguration dieses Register. Zunächst müsste überprüft werden, ob die im Berliner Großraum verkehrenden Flugzeuge dieses Register aussenden.

Die gewonnen Daten und Verbesserungsansätze können außerdem hervorragend als Grundlage für weitere Bachelor- oder Masterarbeiten dienen.

6 Quellenverzeichnis

J. COOTE, 2012: Mapping planes using ADS-B. University of Sussex

C. DRÜE, W. FREY, A. HOFF, T. HAUF, 2008: Aircraft type-specific errors in AMDAR weather reports from commercial aircraft. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **134**, 229-239

J. L. GERTZ, 1984: Fundamentals of Mode S Parity Coding. *Massachusetts Institute of Technology*

S. DE HAAN, 2009: Quality assessment of high resolution wind and temperature observation from ModeS. *KNMI Scientific Report* **WR 2009-07**

S. DE HAAN, A. STOFFELEN, 2010: Assimilation of High Resolution Mode-S Wind and Temperature Observation in a Limited Area NWP-model. *KNMI Scientific Report* **WR 2010-03**

S. DE HAAN, 2011: High-resolution wind and temperature observations from aircraft tracked by Mode-S air traffic control radar. *Journal of Research*, **116**

S. DE HAAN, M. DE HAIJ, J SONDIJ, 2013: The use of a commercial ADS-B receiver to derive upper air wind and temperature observations from Mode-S EHS information in The Netherlands. *KNMI Technical Report* **336**

S. DE HAAN, 2014: Availability and quality of Mode-S MRAR (BDS4.4) in the MUAC area : a first study, *KNMI internal report*, **IR 2014-01**

T. HAUF, K. STURM, 2014: Bedeutung und Aufgaben der Flugmeteorologie - heute und morgen. *promet*, Jahrgang 38 Heft 3/4

A. HOFF, C. DRÜE, H. R. SONNABEND, 2013: Messphysik und Datenverarbeitung der Verkehrsflugzeuge als meteorologische Sensorträger. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 241*

ICAO, 1976: U.S. Standard Atmosphere.

ICAO, 2011: Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter. Second Edition

A. MARSHALL, 2009: Am Expanded Description of the CPR Algorithm. *RT-CA Special Committee 186, Working Group 3, ADS-B 1090 MOPS, Revision B*

R. PETERSEN, L. CRONCE, W. FELTZ, E. OLSON, D. HELMS, 2011: Validation Studies of WVSS-II Moisture Observations. *Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS), University of Wisconsin - Madison, NOAA*

R. PETERSEN, 2012: Impact of AMDAR data in NWP Forecasts. WMO AM-DAR Panel (Fifteenth Session)

B. STRAJNAR, 2012: Validation of Mode-S Meteorological Routine Air Report aircraft observations. *Journal of Geophysical Research* 117

7 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ACARS	Aircraft Communications Addressing and Reporting System textbasiertes Kommunikationssystem
ACAS	Airborne Collision Avoidance System von der ICAO standisiertes Kollisionsvermeidungssystem
ALT	Altitude am Höhenmesser angezeigte, barometrische Höhe
AMDAR	Aircraft Meteorological Data Relay modernes System zur gerologischen Datengewinnung
ARINC	Aeronautical Radio Incorporated
ASDAR	Aircraft-to-Satellite Data Relay
CPR	Compact Position Reporting Positionsmeldeverfahren für ADS-B
EHS	Enhanced Surveillance erweiterte Funktionalitäten für Mode-S (112bit-Pakete)
EUMETNET	European Meteorological Network
ES	Extended Squitter 112bit-Pakete bei ADS-B
FAA	Federal Aviation Administration US-Luftfahrtbehörde
FL	Flight Level
GS	ground speed Geschwindigkeit relativ zum Boden
HDG	heading Steuerkurs
IAS	indicated airspeed angezeigte Fluggeschwindigkeit
ICAO	International Civil Aviation Organisation internationale Zivilluftfahrtbehörde
ISA	international standard atmosphere internationale Standardatmosphäre
MRAR	Meteorological Routine Air Report meteorologische Routinemeldung über Mode-S EHS
MDCRS	Meteorological Data Collection and Reporting System US-amerikanisches AMDAR-Programm
NOAA	National Oceanic and Atmosphere Administration nationaler Wetterdienst der USA
SDR	Software Defined Radio softwarebasierte Signalverarbeitung
TC	Type Code Bestandteil des Datenblocks bei ADS-B ES
TRK	track tatsächliche Flugrichtung relativ zum Boden
TAS	true airspeed Geschwindigkeit relativ zur umgebenen Luft
TCAS	Traffic Alert and Collision Aviodance System flugzeugseitig implementiertes ACAS

8 Anhang

8.1 Vertikalplot



Abb. 17: Beispiel eines der stündlich generierten Vertikalplots. Innerhalb des Zeitraums zwischen 18z und 19z wurde der Berliner Raum von einer gewittrigen Schauerstaffel erfasst, die sich durch einen passierenden Kurzwellentrog während einer Rückseitenlage bildete. Der mit der Passage einhergehende bodennahe Windsprung von Südwest auf Nordwest zeigt sich unterhalb von etwa 925hPa als bimodale Verteilung der Windmesspunkte.

8.2 BDS-Register

Folgend sind die Inhalte der BDS-Register aufgeführt, die für die Rekonstruktion dekodiert werden. Zusätzlich dazu ist das BDS-Register 4,4 für MRAR-Meldungen dargestellt. Quelle: ICAO, 2011: Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter. *Second Edition*

8.2.1 BDS 0,5 - DF17

Appendix A

A-41

Table A-2-5. BDS code 0,5 — Extended squitter airborne position

MB FIELD

1	MSB	PUPPOSE: To provide accurate airborne position information
2	FORMAT TYPE CODE	Por OSE. To provide accurate andonie position mormation.
3	(specified in §A.2.3.1)	Surveillance status shall be coded as follows:
4		0 = No condition
5	LSB	1 = Permanent alert (emergency condition)
6	MSB SURVEILLANCE STATUS	2 = Temporary alert (change in Mode A identity code other than omerganey condition)
7	LSB (specified in §A.2.3.2.6)	- 3 = SPI condition
8	SINGLE ANTENNA FLAG (SAF) (specified in §A.2.3.2.5)	<u>.</u>
9	MSB	Codes 1 and 2 shall take precedence over code 3.
10		When horizontal position information is unavailable, but altitude
11		information is available, the airborne position message shall be
12	ALTITUDE (appointed by the EORMAT TYPE CODE)	transmitted with a format TYPE Code of ZERO (0) in bits 1 — 5 and the barometric pressure altitude in bits 9 to 20. If peither
14	(specified by the FORMAT TIPE CODE)	horizontal position nor barometric altitude information is available,
15		then all 56 bits of transponder register 0516 shall be zeroed. The
16	This is (1) the altitude code (AC) as specified in	ZERO format TYPE Code field shall indicate that latitude and
17	\$3.1.2.6.5.4 of Annex 10. Volume IV. but with the	shall indicate that altitude information is unavailable.
18	M-bit removed, or (2) the GNSS height (HAE)	
19	······································	
20	LSB	
21	TIME (T) (specified in §A.2.3.2.2)	-
22	CPR FORMAT (F) (specified in §A.2.3.2.1)	-
23	MSB	-
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30	ENCODED LATITUDE	
31	(CPR airborne format specified in §AC.2.6)	I
32		
33		
34		
36		
37		
38		
39	LSB	
40	MSB	-
41		
42		
43		
44		
45		
46		
47	ENCODED LONGITUDE	
48	(CPR airborne format specified in §AC.2.6)	
49		
50		
51		
52		
53		
54		
56	LSB	

8.2.2 BDS 0,9 - DF17

Appendix A

A-45

Table A-2-9a. BDS code 0,9 — Extended squitter airborne velocity (Subtypes 1 and 2: Velocity over ground)

MB FIELD

Γ	1	MSB		1	
	2			0	
	3	FORMAT 1	TYPE CODE = 19	0	
	4			1	
	5	I SB		1	
	6	SUBTYPE 1	0	SUBTYPE 2	0
	7	00011121	0	00011122	1
	0		1		0
ł	0	INTENT CHANCE	FLAC (apposition)	n 6A 2 2 5 2)	0
	10		ELAC (specified)	II 9A.2.3.3.3)	
	11	MCD NAVICATI		TV.	
	40	NOD NAVIGATI			
	12	1.00	CATEGORT		
	13	LOD		(NUCR)	
	14	DIRECTION BIT	or E-W Velocity: U	= East, 1 = west	
	15		EAST - WE		
ŀ	16	NORMAL: LSB =	1 knot	SUPERSONIC: L	SB = 4 knots
	17	All zeros = no veic	city information	All zeros = no velo	ocity information
	18	value	velocity	value	velocity
	19	1	0 kt	1	0 kt
	20	2	1 kt	2	4 kt
	21	3	2 Kt	3	8 Kt
	22				
	23	1 022	1 021 Kt	1 022	4 084 Kt
ŀ	24	1 023	>1 U21.5 Kt	1033	>4 086 Kt
	25	DIRECTION BIT I	or N-S Velocity: 0	= North, T = South	
	20		1 knot		CP = 4 knoto
	20	All zoron = no volo	r Killot	All zoros - no vol	3B - 4 KIUIS
	20	Value	Volocity	Value	Volocity
	29	value 1	<u>velocity</u>	value	Olt
	31	2	1 41	2	4 kt
	32	3	2 kt	3	4 Kt
ł	33	0	2 10	Ŭ	0 M
	34	1 022	1.021 kt	1 022	4 084 kt
	35	1 023	>1 021 5 kt	1 023	>4 086 kt
	36	SOURCE BIT FOR	R VERTICAL RAT	F = 0 = GNSS = 1 = F	laro
	37	SIGN BIT FOR VE	RTICAL RATE: 0	= Up. 1 = Down	
	38		VERTIC	AL RATE	
	39	All zeros = no vert	ical rate informatio	n; LSB = 64 ft/min	
	40	Val	lue	Vertica	al Rate
t	41	1		0 ft/	min
	42	2	2	64 ft	/min
	43				
	44	51	0	32 576	6 ft/min
	45	51	1	>32 60	8 ft/min
	46				
	47	1	RESERVED FOR	TURN INDICATOR	
ļ	48				
	49	GNSS ALT. SIGN	BIT: 0 = Above ba	aro alt., 1 = Below b	aro alt.
	50	GNSS ALT. DIFFE	ERENCE FROM B	ARO. ALT.	
	51	All zeros = no info	rmation; LSB = 25	π	
	52	Val	lue	Differ	ence
	53	1		0	IL
	04 66	2		25	0 IL 05 0
	55	12	10	دا د ده د	10 N 7 E A
L	00	12		3 13	7.0 IL

PURPOSE: To provide additional state information for both normal and supersonic flight.

Subtype shall be coded as follows:

Code	Velocity	Туре
0	Res	erved
1	GroundSpood	Normal
2	GroundSpeed	Supersonic
3	Aircoood Hooding	Normal
4	Anspeed, rieading	Supersonic
5	Reserved	
6	Res	erved
7	Res	erved

IFR capability shall be coded as follows:

- 0 = Transmitting aircraft has no capability for ADS-Bbased conflict detection or higher level (class A1 or above) applications.
- Transmitting aircraft has capability for ADS-B-based conflict detection and higher level (class A1 or above) applications.

NUC_R shall be coded as follows:

	NUC _R	Horizontal Velocity Error (95%)	Vertical Velocity Error (95%)
ſ	0	Unknown	Unknown
ſ	1	< 10 m/s	< 15.2 m/s (50 fps)
ſ	2	< 3 m/s	< 4.6 m/s (15 fps)
ſ	3 < 1 m/s		< 1.5 m/s (5 fps)
4 < 0.3		< 0.3 m/s	< 0.46 m/s (1.5 fps)

8.2.3 BDS 5,0 - DF20/21

Appendix A

A-73

Table A-2-80. BDS code 5,0 — Track and turn report

MB FIELD

1	STATUS	PURPOSE: To provide track and turn data to the ground systems.
2	SIGN 1 = Left Wing Down	
3 4	MSB = 45 degrees	 If the value of the parameter from any source exceeds the range allowable in the register definition, the maximum allowable value in the correct positive or negative sense shall be used instead.
5 6	ROLL ANGLE	Note. — This requires active intervention by the GFM.
7		2) The data entered into the register shall whenever possible be
8	Range = [-90, + 90] degrees	derived from the sources that are controlling the aircraft.
10 11	I SB = 45/256 degrees	 If any parameter is not available on the aircraft, all bits corresponding to that parameter shall be actively set to ZERO by the GFM.
12	STATUS	 The LSB of all fields shall be obtained by rounding.
13	SIGN 1 = West (e.g. 315 = -45 degrees)	
14 15	MSB = 90 degrees	Note 1.— Two's complement coding is used for all signed fields as specified in §A.2.2.2.
16		Note 2.— Additional implementation guidelines are provided in
17	TRUE TRACK ANGLE	§ <mark>GD</mark> .2.4.5.
19	Range = [-180, +180] degrees	
20		
21		
22		
23	LSB = 90/512 degrees	
24	STATUS	
25	MSB = 1 024 knots	
20		
28	GROUND SPEED	
29		
30	Range = [0, 2 046] knots	
31		
32		
33		
34	LSB = 1 024/512 knots	
35	STATUS	
36	SIGN 1 = Minus	
37	MSB = 8 degrees/second	
39		
40	TRACK ANGLE RATE	
41	Range = [-16, +16] degrees/second	
42		
43		
44		
45	LSB = 8/256 degrees/second	
46	STATUS	
47	MSB = 1 024 knots	
48	4	
49		
51	INCEAINGFEED	
52	Range = [0, 2 046] knots	
53	range for evel-	
54		
55		
56	LSB = 2 knots	

8.2.4 BDS 6,0 - DF20/21

Appendix A

Table A-2-96. BDS code 6,0 — Heading and speed report

A-79

MB FIELD

1	STATUS	PURPOSE: To provide heading and speed data to ground systems.
2	SIGN 1=West (e.g. 315 = -45 degrees)	 If the value of a parameter from any source exceeds the range
3	MSB = 90 degrees	allowable in the register definition, the maximum allowable value in the correct positive or negative sense shall be used instead.
5 6	MAGNETIC HEADING	Note.— This requires active intervention by the GFM.
7 8	Range = [-180, +180] degrees	 The data entered into the register shall whenever possible be derived from the sources that are controlling the aircraft.
9 10		3) The LSB of all fields shall be obtained by rounding.
11		 When barometric altitude rate is integrated and smoothed with inertial
12	LSB = 90/512 degrees	vertical velocity (baro-inertial information), it shall be transmitted in the
13	STATUS	Inertial Vertical Velocity field.
14	MSB = 512 knots	Note 1.— Barometric Altitude Rate contains values solely derived from
15 16		barometric measurement. The Barometric Altitude Rate is usually very unsteady and may suffer from
17	INDICATED AIRSPEED	barometric instrument inertia.
18		Note 2 — The Inertial Vertical Velocity is also providing information
19	Range = [0, 1023] knots	on vertical movement of the aircraft but it comes from
20		equipments (IRS, AHRS) using different sources used for
21		parameter.
22		perentities
23		Note 3. — Two's complement coding is used for all signed fields as
25	MSB = 2 048 MACH	specified in gr.z.z.z.
26		Note 4.— Additional implementation guidelines are provided in
27		§ <mark>GD</mark> .2.4.6.
28	MACH	
29		
30	Range = [0, 4.092] MACH	
31		
32		
33		
34	LSB = 2.048/512 MACH	
35	STATUS SICN 1 = Palaw	
37	MSB = 8 192 feet/minute	
38	WOD - 0 132 leeunindie	
39		
40	BAROMETRIC ALTITUDE RATE	
41		
42	Range = [-16 384, +16 352] feet/minute	
43		
44		
45	LSB = 8 192/256 = 32 feet/minute	
46	STATUS SIGN 1 = Polow	
47	MSB = 8 192 feat/minute	
40	MOD - 0 102 IOD/IIIIIUU	
50		
51	INERTIAL VERTICAL VELOCITY	
52		
53	Range = [-16 384, +16 352] feet/minute	
54		
55		
56	LSB = 8 192/256 = 32 feet/minute	

8.2.5 BDS 4,4

opendix D E				
	Table <mark>-DE</mark> -2-68. BDS Co	de 4,4 — Meteorological routine air report		
B FIELD				
1 2	RESERVED	PURPOSE: To allow meteorological data to be collected by ground systems. 1) The definition of bit 48: Turbulence flag:		
4 5 STATUS		0 = signifies turbulence data not available in Register 45 ₁₆ . 1 = signifies turbulence data available in Register 45 ₁₆ .		
6 MSB = 25 7	56 knots	Note 1.— The average static pressure is not a requirement of Annex 3.		
3	WIND SPEED	Note 2.— Humidity calculation may result in values greater than 100%.		
0	Range = [0, 511] knots	Note 3.— Two's complement cooling is used for all signed fields as specified in §A.2.2.2.		
12		Note 4.— The requirement for the range of wind speeds in Annex 3 is from 0 to 250 knots.		
4 LSB = 11	not	Note 5.— The requirement for the range of static air temperature in Annex 3 is from -80°C to +60°C.		
16 MSB = 18	WIND DIRECTION (True)			
19 20	Range = [0, 360] degrees			
21				
24 STATUS	0/128 degrees			
25 SIGN 26 MSB = 64	PC			
27 28				
30 31	Range = [-128, +128] °C			
32 33	-			
34 35 LSB = 0.1	25°C			
36 STATUS 37 MSB = 1	024 hPa			
18 19				
10 11	AVERAGE STATIC PRESSURE			
12 13	Range = [0, 2 047] hPa			
14 15				
16 17 LSB = 11	Pa			
8 TURBUL	ENCE FLAG			
50 MSB = 64	1%			
1				
53	HUMIDITY			
j4	Range = [0, 127] %			
56 LSB = 1 9	%			