

# **Analyse der Datenqualität der neuen Multi-Sensor Fallsonde KITsonde**

**Diplomarbeit im Fach Meteorologie**

vorgelegt von

**Daniel Fütterer**

Februar 2010

INSTITUT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMAFORSCHUNG



Karlsruher Institut für Technologie



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Das neue Fallsondensystem</b>	<b>3</b>
2.1	Systemaufbau . . . . .	3
2.1.1	Abwurfbehälter . . . . .	3
2.1.2	Konfigurationsbox . . . . .	4
2.1.3	Antennen- und Empfängereinheit . . . . .	4
2.1.4	Computernetzwerk und Datenverarbeitung . . . . .	4
2.1.5	Die neue Messsonde und Sensoren . . . . .	6
2.2	Andere Fallsondensysteme im Vergleich . . . . .	11
2.2.1	Airborne Vertical Atmosphere Profiling System (AVAPS) . . . . .	11
2.2.2	Karlsruher Fallsonde . . . . .	13
2.2.3	Vergleich zum neuen Fallsondensystem . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Test der Sonden</b>	<b>17</b>
3.1	Labortest in der Klimakammer . . . . .	17
3.1.1	Temperatursequenz in trockener Luft . . . . .	19
3.1.2	Dauertests mit variabler Feuchte . . . . .	23
3.1.3	Feuchtsequenzen . . . . .	28
3.1.4	Vergleich von zwei Produktionsserien von Fallsonden . . . . .	32
3.2	Vergleichsmessung mit der Karlsruher Fallsonde . . . . .	34
3.2.1	Erster Tandemaufstieg, Dienstag, 03.11.2009 . . . . .	35
3.2.2	Zweiter Tandemaufstieg, Donnerstag, 05.11.2009 . . . . .	45
3.3	Vergleichsmessung mit der Vaisala RS92 Radiosonde . . . . .	54
3.3.1	Erster Aufstieg, 01.12.2009, 12 UTC . . . . .	55
3.3.2	Zweiter Aufstieg, 01.12.2009, 18 UTC . . . . .	59
3.3.3	Dritter Aufstieg, 02.12.2009, 00 UTC . . . . .	62
3.3.4	Vierter Aufstieg 02.12.2009, 12 UTC . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Testflüge mit Abwürfen der Sonden von Bord der Do-128</b>	<b>71</b>
4.1	Reichweitentest und Empfängerauswahl . . . . .	71
4.2	Testabwürfe des Abwurfbehälters . . . . .	73

4.3	Abwürfe im Mai 2009 . . . . .	74
4.4	Abwürfe im August 2009 . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Auswertung und Interpretation der Profile</b>	<b>85</b>
5.1	Auswertung eines Profils . . . . .	85
5.2	Ableitbare Größen . . . . .	86
5.2.1	Konvektionsindizes . . . . .	87
5.3	Wetterentwicklung in Lindenberg vom 01.12.2009 bis 02.12.2009 . . . . .	93
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>97</b>
<b>A</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>99</b>

# 1 Einleitung

Für das neue Forschungsflugzeug HALO (High Altitude Long Range) wird am Institut für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zusammen mit den Partnern enviscope GmbH, Frankfurt/M. und GRAW Radiosondes GmbH & Co. KG, Nürnberg ein neues Fallsondensystem „KITsonde“ entwickelt, das zukünftig in vielen für HALO definierten Forschungsfeldern eingesetzt werden kann, wie z.B. „Chemie und Transport von Spurenstoffen in der Troposphäre und unteren Stratosphäre“, „Niederschlag und Strahlungstransport - Kernthemen der Meteorologie und Klimaforschung“, „Erforschung der Auswirkungen von Emissionen des Luftverkehrs auf die Chemie der Tropopausenregion und auf die Bildung von Aerosolen und Wolken“ oder „Transporte und chemische Umsetzungen in konvektiven und turbulenten Systemen“ (DLR, 2001). In weiteren Forschungsfeldern kann das neue Fallsondensystem durch seinen universell einsetzbaren Abwurfbehälter weitere Verwendung finden.

Fallsondensysteme sind seit den 1970er Jahren im Einsatz und werden vor allem in der Hurrikanforschung und -beobachtung eingesetzt (Young et al., 2009). Mitte der 1990er Jahre entwickelten das National Center for Atmospheric Research (NCAR) mit der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zusammen das Fallsondensystem Airborne Vertical Atmosphere Profiling System (AVAPS), das von Vaisala kommerziell erhältlich und weit verbreitet ist. Dieses System ist in über 20 Flugzeugen zugelassen und wurde und wird bei vielen Feldmesskampagnen und im operationellen Betrieb der NOAA zur Hurrikanbeobachtung eingesetzt (Young et al., 2009). Vor allem der operationelle Einsatz in der Hurrikanforschung zeigt, dass ein solches Fallsondensystem ein wichtiges Messsystem darstellt, auch um gefährliche Wettersituationen vermessen zu können und deren weitere Entwicklung basierend auf den Messungen besser vorhersagen zu können und gegebenenfalls rechtzeitig vor Gefahren für Mensch und Infrastruktur zu warnen. Zwischen 1996 und 2008 wurden etwa 16500 RD93 Fallsonden mit dem AVAPS für die Forschung und Hurrikanbeobachtung abgeworfen (Young et al., 2009).

Das neue Fallsondensystem KITsonde ist mit den Abwurfeinrichtungen des AVAPS kompatibel, wodurch das neue System ohne Modifikation auch in anderen Flugzeugen eingesetzt werden kann. Das neue Fallsondensystem wurde als zweigeteiltes System, bestehend aus einem Abwurfbehälter und Messsonden, konzipiert. Mit dem neu entwickelten Abwurfbehälter besteht die Möglichkeit, mehrere Messsonden gleichzeitig freizusetzen und so räumlich hoch aufgelöste Sondierungen von Wetterphänomenen wie z.B. in einem konvektiven System durchzuführen. Durch den Einsatz des Abwurfbehälters besteht auch die Möglichkeit unterschiedliche Sensoren für Sondierungen in der Atmosphäre freizusetzen. Das

neue System kann bis zu 30 gleichzeitig aktive Sonden im Flugzeug empfangen und deren Daten in Echtzeit decodieren und darstellen.

Für das neue Fallsondensystem wurde ebenfalls eine neue Messsonde entwickelt. Durch den Fortschritt in der Mikroelektronik und Sensortechnik können die neuen Fallsonden klein und leicht gebaut werden (Jeannot et al., 2008). Der Einsatz des Global Positioning System (GPS) und zukünftig auch Galileo ermöglicht die genaue Positionsbestimmung und daraus die Berechnung der Größen Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie die Bestimmung des Luftdrucks über die geometrische Höhe. Somit kann auf einen Drucksensor verzichtet werden (Nash et al., 2006). Die Messsonde ist eine Weiterentwicklung der DFM06 Radiosonde der Firma GRAW zur Messung der Standardgrößen Temperatur (T), relative Feuchte (U) und GPS-Position (GPS).

In der vorliegenden Diplomarbeit werden Testmessungen der neuen Fallsonde im Labor und bei Vergleichsabwürfen bzw. Aufstiegen zusammen mit anderen Sondentypen durchgeführt. Ziel der Arbeit ist es, die Datenqualität der neuen Fallsonde zu bestimmen und Verbesserungen anzuregen.

## 2 Das neue Fallsondensystem

### 2.1 Systemaufbau

Das neu entwickelte Fallsondensystem KITsonde setzt sich aus drei Komponenten zusammen: Flugzeugeinbauten, Abwurfbehälter und Messsonden. Mit dem Abwurfbehälter können verschiedenste Sensoren mit Sendeeinrichtung aus dem Flugzeug abgeworfen werden. Der Flugzeugeinbau besteht aus einer Konfigurationsbox, einer Datenerfassungseinheit, einem Computernetzwerk für die Datenverarbeitung und Datenspeicherung sowie einer Antennen- und Empfängereinheit und einer Bedienkonsole. Damit ist es möglich, mit einem Laptop im Flugzeug auf die Daten zuzugreifen und die aktuellen Messdaten anzuschauen und die Abwürfe und Messungen während des Fluges zu verfolgen.

#### 2.1.1 Abwurfbehälter

Der Abwurfbehälter hat die Aufgabe, Sensoren zur Sondierung der Atmosphäre nach dem Abwurf aus dem Flugzeug in einer stabilen Fluglage freizusetzen (Abb. 2.1). Der Behälter hat die Außenmaße einer Vaisala RD93 Sonde und kann mit Hilfe der in vielen Flugzeugen vorhandenen Abwurfeinrichtungen ohne weitere Änderungen abgeworfen werden. Im oberen Bereich des Abwurfbehälters (Abb. 2.1, rechts)



Abb. 2.1: Prototyp des Abwurfbehälters des neuen Fallsondensystems.

befindet sich der Hauptfallschirm (orange) und zwei Bremsklappen (mit B gekennzeichnet). Ein Bügel sichert den Fallschirm und verhindert ein Aufklappen der Bremsklappen bei der Sondenvorbereitung und beim Transport.

Nach dem Abwurf wird der Bügel durch den Luftstrom abgezogen. Die Bremsklappen öffnen sich gegen den Luftwiderstand durch Federkraft und bringen den Behälter in eine stabile Fluglage. Erreichen die Bremsklappen in diesem ersten Abbremsprozess einen Öffnungswinkel von  $70^\circ$  wird der Hauptfallschirm des Behälters freigegeben und herausgezogen. Der Hauptfallschirm ist an einen Federmechanismus gekoppelt, der die Seitenabdeckung des Sensorfachs erst öffnet, wenn der Abwurfbehälter in einem zweiten Abbremsprozess durch den Fallschirm soweit abgebremst wurde, dass die Federkraft etwa dem

1.5-fachen der Gewichtskraft des Behälters entspricht. Nach dem Öffnen des Sensorfachs werden Fallsonden oder andere Sensoren in die Atmosphäre freigesetzt. Auf der linken Seite der Abb. 2.1 ist das Sondenfach mit zwei geladenen Fallsonden zu sehen.

### 2.1.2 Konfigurationsbox

In der Konfigurationsbox, die als EMV-dichte Einheit ausgeführt ist, werden die Fallsonden und Abwurfbehälter für den Abwurf vorbereitet. Innerhalb der Box befindet sich eine 400 MHz-Antenne zum Empfang der Sonden im Flugzeug und ein GPS-Repeater zur Bereitstellung des GPS-Signals innerhalb des Gehäuses. Gemäß den Richtlinien (RTCA DO-160F) für die Zulassung für den Flugverkehr muss die Konfigurationsbox auf elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) getestet sein, um keine Störungen der Flugzeugelektronik zu verursachen. Die Sonden werden durch den Konfigurations-PC über Kabel initialisiert und mit Strom versorgt. Durch eine integrierte 400 MHz-Antenne kann innerhalb der Box eine Funktionsprüfung der Sonden durchgeführt werden.

### 2.1.3 Antennen- und Empfängereinheit

Die Empfängerbox enthält 32 Analogempfänger (Helpert Typ HH183) zum Empfang der Sonden signale im meteorologischen Frequenzband 400.0 MHz bis 406.0 MHz. Die Empfänger bieten die Möglichkeit die Empfangsfrequenzen frei zu wählen und verfügen über eine automatische Frequenznachführung (AFC). Zwei Empfänger sind für die Aufnahme eines Frequenzspektrums bzw. zur Funktionsprüfung der Sonden reserviert. Ein Empfänger überprüft kontinuierlich den Frequenzbereich zwischen 400.0 MHz und 406.0 MHz über die 400 MHz-Außenantenne des Flugzeugs und speichert die Empfangspegel ab. So können neue Sonden mit freien Sendefrequenzen initialisiert werden. Der zweite Empfänger wird für die Funktionsprüfung der neu initialisierten Sonden in der Konfigurationsbox verwendet. Nach der Initialisierung einer Sonde durch den Konfigurations-PC wird der Empfänger auf die Sondenfrequenz eingestellt und der Datenempfang sowie das Signal der Sonde überprüft. Die 400 MHz-Außenantenne des Flugzeugs empfängt die Funksignale der aktiv messenden Sonden und leitet die Signale über einen Antennenvorverstärker und einen Leistungsteiler an die übrigen 30 Empfänger weiter.

### 2.1.4 Computernetzwerk und Datenverarbeitung

Das Computernetzwerk für die Datenverarbeitung und Konfiguration wird mit drei Computern (PCs) realisiert. Mit dem Konfigurations-PC werden die Sonden initialisiert, die Sendefrequenz der Sonde festgelegt und ein Empfänger auf diese Frequenz eingestellt. Die nötige Software liefert der Sondenhersteller GRAW in der Form einer Dynamic Link Library (DLL), die von enviscope in einem LabVIEW-Programm mit Bedienoberfläche integriert wird. Der Initialisierungsvorgang schaltet die Sonde ein, konfiguriert die Sendefrequenz und den GPS-Empfänger. Die Kalibrierdaten der Temperatur- und Feuchte-sensoren werden aus dem Sonden Speicher ausgelesen und zusammen mit der Sondennummer abgespeichert und an den Decodier-PC gesendet. Die Kalibrierdaten sind die Grundlage, um aus dem empfangenen

Sondensignal korrekte physikalische Werte bei der Decodierung des Signals zu erhalten. Der minimale Frequenzabstand, den der Konfigurations-PC zwischen zwei Sondenfrequenzen einstellen kann beträgt 20 kHz. Somit ergeben sich 300 Kanäle zwischen 400.0 MHz und 406.0 MHz. Direkt benachbarte Frequenzen können jedoch ein Problem darstellen, wenn die AFC bei den Empfängern aktiv ist. Dann kann es vorkommen, dass sich die Funkfrequenz der Sonde durch einen Frequenzdrift des Senders (z.B. durch Temperaturänderungen) ändert und der Empfänger durch die AFC die Frequenz so lange nachregelt bis der Empfänger eine Nachbarfrequenz erreicht und der Empfänger das Signal der Nachbarfrequenz einer anderen Sonde empfängt, deren Signal stärker sein kann. Der Konfigurations-PC bestimmt aufgrund der Frequenzbelegung den maximal möglichen Frequenzabstand bei der Initialisierung neuer Sonden. Die AFC der Empfänger ist auf einen Frequenzbereich  $\pm 8$  kHz begrenzt, um ein solches Überspringen zu verhindern. Die Sonden sind zusätzlich mit einem hochwertigen Sendequarz bestückt, der eine besonders stabile Sendefrequenz gewährleistet, sodass ein Frequenzabstand von 40 kHz realisiert werden kann und somit bis zu 150 Sonden aktiv senden können. Solange die Sonden am Initialisierungskabel angeschlossen sind, werden sie über das Kabel mit Strom versorgt. Mit dem Abziehen des Kabels zum Abwurf schalten die Sonden auf die eigene Batterieversorgung um.

Innerhalb der Konfigurationsbox können die gesendeten Daten auf Vollständigkeit (T, U und GPS-Daten) und Fehlfunktion überprüft werden. Die erste Positionsbestimmung der Sonden über das GPS-Signal kann je nach Lagerdauer und Inaktivität des GPS-Chips bis zu 10 Minuten dauern. Der Konfigurations-PC ist für die Initialisierung und Frequenzkonfiguration mit der Konfigurationsbox und der Empfängereinheit verbunden. Der Datenerfassungs-PC digitalisiert die ankommenden Analogsignale der 32 Empfänger mit National Instruments Analog-Digitalwandler Karten und speichert die Rohdaten auf einem RAID-Festplattensystem. Gleichzeitig sendet er die Rohdaten über eine Netzwerkverbindung via User Datagram Protokoll (UDP) weiter an den Decodier-PC. Mit dem Decodier-PC werden aus den 31 Sonden signalen in Echtzeit durch die Decodierung physikalische Daten erzeugt und gespeichert. Hierfür stellt GRAW eine DSP-Software in Form einer DLL für die Signaldecodierung zur Einbindung in ein LabVIEW-Programm zur Verfügung. Es müssen 31 Instanzen der DSP-Software parallel laufen können, um die Signale der 31 Sonden zu decodieren. Anhand der Sondennummer, die im Datenstrom mit übertragen wird, sucht sich die DSP-Software die zur Sonde gehörenden Kalibrierdaten. Es ist wichtig, dass die Kalibrierdaten von allen gelieferten und eingesetzten Sonden auf dem Decodier-PC vorliegen. Die gespeicherten Digitaldaten auf den Datenerfassungs-PC können durch Nachprozessierung durch die DSP-Software zur Datenauswertung herangezogen werden, falls Probleme oder Übertragungsfehler am Decodier-PC auftreten oder die zugehörigen Kalibrierdaten nicht auf dem Decodier-PC vorliegen. Das LabVIEW-Programm der Datenerfassung bietet die Möglichkeit, die Daten aller Sonden zu visualisieren und die Profildaten während der Sondierung zu beobachten. Neben der Darstellung der Daten über den Decodier-PC im Flugzeugeinbau kann auch mit einem Laptop auf die physikalischen Daten über eine Netzwerkverbindung zugegriffen und die Abwürfe und Profile visuell verfolgt werden. Nach dem

Ende einer Sondierung können so die Profildaten gleich zur weiteren Auswertung dann auf den Laptop gespeichert werden.

### 2.1.5 Die neue Messsonde und Sensoren

Die eingesetzte Messsonde ist eine Weiterentwicklung der DFM06 Radiosonde von GRAW (Abb. 2.2). Die Fallsonde ist 31 cm lang und 2.5 cm breit. Zwei Platinen liegen als Sandwich direkt aufeinander.

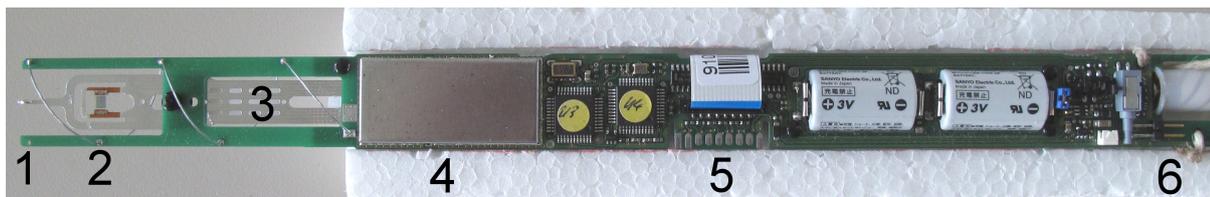


Abb. 2.2: Die Platine des Messmoduls der KITsonde.

Am unteren Ende der Sonde befindet sich der Temperatursensor (1) und der Feuchtesensor (2) montiert auf einem beschichteten Sensorträger (3) (Abb. 2.2). Auf der Platine ist ein frequenzstabiler Sendequarz (4) mit zugehöriger Helixantenne um den Sensorträger verbaut. Über den Initialisierungsstecker (5) werden die Sonden eingeschaltet und konfiguriert. Bei Position 6 am oberen Ende der Sonde befinden sich die GPS-Antenne und das zugehörige GPS-Modul (auf der Rückseite), ein Ausschalter für die Sonde, ein Anschluss für ein Satellitenmodem, zwei Steckbrücken für die Batterieversorgung und die Sendeleistung sowie Kontrollleuchten für das GPS-Signal und den Status der Sonde. Die Sonde liegt in einer provisorischen Styroporisolierung, die zum Schutz der Sondenelektronik bei allen Messungen eingesetzt wurde. Die Sondenelektronik und Datenverarbeitung in der Sonde entspricht weitgehend der DFM06 Radiosonde. Die Übertragung der Temperatur- und Feuchtwerte erfolgt innerhalb von 672 ms über den Sender. Die Übertragung der GPS-Daten läuft im Hintergrund der Temperatur- und Feuchtemessung und wird sekundlich gesendet. Das Funksignal ist codiert mit dem „Digital bi-phase Manchester“-Verfahren. Für die Decodierung der Sondensignale wird von GRAW eine DSP-Software zur Verfügung gestellt.

Der Sensorträger und der Temperatursensor ist mit Aluminium beschichtet. Diese Beschichtung dient als Strahlungsschutz im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich. Der Strahlungseinfluss durch die Sonneneinstrahlung am Tag und die Infrarotstrahlung nachts kann somit minimiert werden. Die WMO (CIMO Guide 7th Edition Chapter 12) gibt die Differenz zwischen Tag- und Nachtsondierungen für die besten Sensoren (Vaisala RS92, kapazitiver Temperatursensor) mit 0.15 K bei 300 hPa, 0.3 K bei 100 hPa, 0.4 K bei 30 hPa und 0.6 K bei 10 hPa Luftdruck an. Der Temperaturfehler bei Aufstiegen am Tag wird für die besten Sensoren auf 0.3 K bei 30 hPa und 0.6 K bei 10 hPa Luftdruck geschätzt.

Als Temperatursensor wird ein NTC-Thermistor von EPCOS verwendet (Technische Daten, siehe Tab. 2.1). Der Thermistor, ein thermischer Widerstand, ändert mit der Temperatur seinen Widerstand, als NTC-Widerstand oder Heißleiter nimmt der Widerstand mit zunehmender Temperatur ab. Der Zusam-

menhang zwischen dem Widerstand  $R$  und der Temperatur  $T$  ist nicht linear und lässt sich als Exponentialgleichung darstellen, (WMO CIMO Guide 7th Edition Chapter 12):

$$R = A \cdot \exp(B/T) \quad . \quad [2.1]$$

Die Koeffizienten  $A$  und  $B$  sind Konstanten. Zum Schutz hat der Thermistor einen Glasüberzug.

Tab. 2.1: Technische Details zum NTC-Thermistor von EPCOS (Bestellnummer B57540G0502).

Klimakategorie (IEC 60068-1)		55/250/56
Widerstandstoleranz	$\Delta R_R / R_R$	$\pm 1, \pm 2, \pm 3\%$
Thermische Abkühlzeitkonstante in Luft	$\tau_c$	$\approx 3 \text{ s}$
Genauigkeit	$\Delta T$	$\approx \pm 0.2 \text{ K}$
Auflösung	$\Delta T$	0.01 K

Der Temperaturbereich (Klimakategorie) des Sensors ist mit  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $+250 \text{ }^\circ\text{C}$  angegeben. Die Sensoren werden durch den Hersteller EPCOS bei der Produktion durch Tests auf Zuverlässigkeit geprüft. Alle Sonden werden zudem beim Sondenhersteller GRAW mit einer Temperatursequenz und einer Feuchtesequenz kalibriert. Die Kalibrierung durch GRAW für den Temperatursensor erfolgt über 12 Stützpunkte zwischen  $-80 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Aus den 12 Messpunkten wird eine Ausgleichsfunktion mit einem Polynom 5. Grades gebildet und in einem Electrically Erasable Programmable Read Only Memory (EEPROM) auf der Sonde gespeichert (persönliche Mitteilung Herr Schmidmer, GRAW).

Zur Messung der relativen Feuchte ist der kapazitive Feuchtesensor HC103M2 von E+E verbaut. Auf einem Trägerplättchen ist der Kondensator mit dem Sensorträger verbunden. Zwischen den Kondensatorplatten befindet sich ein feuchteempfindliches Polymer. Eine Feuchteänderung bewirkt eine Veränderung der dielektrischen Eigenschaften des Polymers und führt zu einer messbaren Kapazitätsänderung des Kondensators. Die Kapazität  $C$  eines Plattenkondensators lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad . \quad [2.2]$$

In der Formel entspricht  $A$  der Plattenoberfläche,  $d$  dem Plattenabstand,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$  der Permittivität des Vakuums und  $\epsilon_r$  der Permittivität des Dielektrikum, hier dem Polymer. Die Kapazität steigt linear mit zunehmender Feuchte an, genaue Kennlinien können berechnet werden. Über den Feuchtebereich  $0 \%$  bis  $98 \%$  relative Feuchte ist die Abweichung mit einer linearen Annahme  $< \pm 2\%$  relative Feuchte. Die Zeitkonstante des Feuchtesensors ist abhängig von der Temperatur und nimmt mit abnehmender Temperatur zu. Die Tab. 2.3 zeigt typische Zeitkonstanten, abgelesen aus dem Datenblatt des Sensors. In der aktuellen GRAWMet-Software Version 04.06.02 ist eine neue Formel, vorgeschlagen von Dr. F. Immler (Deutscher Wetterdienst (DWD), Lindenberg), für die Berechnung von Temperatur und Feuchte integriert, die den Einfluss der Zeitkonstante besser berücksichtigt.

Mit  $j = i + k$  und  $k$  als Index des Datenpunkts im Profil.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=-\infty}^0 X_i \cdot e^{-(t_0-t_i)/\tau}}{\sum_{i=-\infty}^0 e^{-(t_0-t_i)/\tau}} = \frac{X_0 + \sum_{i=-\infty}^{-1} X_i \cdot e^{(t_i-t_0)/\tau}}{\sum_{i=-\infty}^0 e^{(t_i-t_0)/\tau}} \quad [2.3]$$

$$X_0 = \bar{X} \cdot \sum_{i=-\infty}^0 e^{(t_i-t_0)/\tau} - \sum_{i=-\infty}^{-1} X_i \cdot e^{(t_i-t_0)/\tau} \quad [2.4]$$

$$X_k = \bar{X}_k \cdot \left( 1 + \sum_{j=0}^{k-1} e^{(t_j-t_k)/\tau} \right) - \sum_{j=0}^{k-1} X_j \cdot e^{(t_j-t_k)/\tau} \quad [2.5]$$

$$X_k = \bar{X}_k + \sum_{j=0}^{k-1} (\bar{X}_k - X_j) \cdot e^{(t_j-t_k)/\tau} \quad [2.6]$$

Tab. 2.2: Technische Details zum kapazitiven Feuchtesensor HC103M2 von E+E, RH = relative Feuchte.

Nennkapazität	bei 30 °C	160 ± 40 pF
Empfindlichkeit		0.55pF/% RH
Arbeitsbereich	Feuchte	0 % bis 100 % RH
	Temperatur	-80 °C bis 120 °C
Linearitätsfehler	0 % bis 98 % RH	<±2 % RH
Hysterese		1.9 ± 0.25 % RH
Temperaturempfindlichkeit		dC = -0.0019·RH· (T-30 °C) [pF]

Tab. 2.3: Typische Werte der Zeitkonstante aus dem Datenblatt:

Temperatur in °C	Zeitkonstante $\tau$ in s
20	0.6
0	0.9
-20	≈ 4.5
-40	≈ 25
-58	>100

Im Gegensatz zur DFM06 Radiosonde soll der Feuchtesensor der Fallsonde ohne Schutzkappe betrieben werden. Der Feuchtesensor wird von GRAW über fünf Stützpunkte im Bereich zwischen 15 % und 90 % relative Feuchte bei einer konstanten Temperatur von 25 °C kalibriert. Als Kalibrierfunktion

des Sensors wird aus den fünf Stützpunkten ein Polynom 3. Grades gebildet und ebenfalls im Sonden-EEPROM gespeichert.

Als GPS-Modul wird zur Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung ein Jupiter32LP von Navman eingesetzt, das sich durch seine kompakte Bauweise und seiner geringen Stromaufnahme auszeichnet. Zum Einsatz kommt darin ein SiRFstar III GSC3/LP-Chip, der im L1-Band bei 1575.42 MHz die GPS-Signale empfängt. Er beherrscht das SiRF-Binary-Protokoll sowie das National Marine Electronics Associations (NMEA) Datenprotokoll und hat eine Ausgabefrequenz von 1 Hz. Die Positionsverfolgung (Tracking) wird bis zu einer Signalstärke von -159 dBm unterstützt. Die Zeit bis zum ersten gültigen GPS-Signal (Time to First Fix (TTFF)) beträgt bei guten Bedingungen (open sky bei -125 dBm) etwa 40 Sekunden bei einer ersten Initialisierung des Chips. In der Praxis muss beim Einsatz der Sonden vor dem Start ein stabiles GPS-Signal mit mehr als vier empfangenen GPS-Satelliten bestehen, um genaue Positions- und Geschwindigkeitsdaten zu erhalten. Der Empfang von GPS-Signalen im Innern des Flugzeugs wird durch den GPS-Repeater in der Konfigurationsbox gewährleistet. Eine kurzzeitige Unterbrechung des GPS-Signals, z.B. beim Transport von der Konfigurationsbox zur Abwurfteinrichtung stellt kein Problem dar. Die Wiederaufnahme des Signals bei zuvor bestehendem Empfang liegt bei wenigen Sekunden. Die Genauigkeit der GPS-Daten gibt der Hersteller des GPS-Chips in Tab. 2.4 und den Funktionsbereich des GPS-Moduls gibt Navman in Tab. 2.5 an.

Tab. 2.4: Genauigkeit des GPS-Chips SiRFstar III GSC3/LP.

Parameter	Genauigkeit
Horizontale Position	<2.5 m
Geschwindigkeit	<0.01 $ms^{-1}$
Richtung	<0.01°

Tab. 2.5: Funktionsbereich des GPS-Moduls Navman Jupiter32LP.

Parameter	Funktionsbereich
Temperatur	-40 °C bis +85 °C
Feuchte	0 % bis 95 % nicht kondensierend
Höhe	-304 m bis 18000 m, Referenz Meeresspiegel
maximale Geschwindigkeit	500 $ms^{-1}$
maximale Beschleunigung	39.2 $ms^{-2}$

Der Funktionsbereich des GPS-Moduls gewährleistet einen Betrieb bis zu Temperaturen von -40 °C. Da in 12 km Höhe typischerweise niedrigere Temperaturen (US Standardatmosphäre:  $T(12 \text{ km}) \approx -56 \text{ °C}$ )

vorherrschend, müssen die Sonde und das GPS-Modul gegen die tiefen Temperaturen gut isoliert werden, um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten.

Moderne GPS-Radiosonden verzichten auf einen Druckmesser, um die Sonden leichter und kompakter bauen zu können. Die Fallsonde hat wie die DFM06 Radiosonde keinen Druckmesser (TU-GPS-Sonde). Dies ist durch verbesserte Verfahren und genauere GPS-Empfänger möglich, wie der Radiosondenvergleichstest der WMO auf Mauritius 2005 (Nash et al., 2006) zeigte, bei der einige Hersteller auf einen Druckmesser verzichteten. Die Höhengenaugigkeit bei GPS-Messungen in Höhen über 16 km ist sogar besser als die Druckauflösung der üblicherweise verwendeten Druckdosen. Auch die Berechnung der geopotentiellen Höhe  $\Phi$  mit der GPS-Höhe  $z$  erzielte eine deutliche Verbesserung als die Bestimmung über die Drucksensoren. Zu beachten ist die Verwendung des korrekten Wertes für die Schwerebeschleunigung  $g(\varphi, z)$ , in Abhängigkeit von der geographischen Breite  $\varphi$  und geometrischen Höhe  $z$ . Die Schwerebeschleunigung kann hinreichend genau durch die empirische Formel (Pichler, S.163 Formel 6.5)

$$g(\varphi, z) = 9.80617 \cdot (1 - 0.00259 \cos(2\varphi)) \cdot (1 - 3.14 \cdot 10^{-7} z) \quad [2.7]$$

mit der Einheit  $ms^{-2}$  berechnet werden. Die geopotentielle Höhe  $\Phi$  kann unter Vernachlässigung der Höhenabhängigkeit der Schwerebeschleunigung näherungsweise durch (Pichler, S.163 Formel 6.6)

$$\Phi = \frac{1}{9.8} \int_0^z g(\varphi, z') dz' \cong \frac{g(\varphi)z}{9.8} \quad [2.8]$$

berechnet werden. Die geopotentielle Höhe mit der Einheit geopotentielle Meter  $1 gpm = 9.8 J kg^{-1}$  (9.8 entspricht dem Zahlenwert der Schwerebeschleunigung bei  $38^\circ$  geographischer Breite) hat den Vorteil, dass dem Geopotential  $\phi \cong g(\varphi)z$  eine Höhe zugeordnet werden kann, die in etwa der geometrischen Höhe der betreffenden Geopotentialfläche bzw. Druckfläche im hydrostatischen Gleichgewicht entspricht. Der Druck wird durch eine Berechnung mit der barometrischen Höhenformel abgeleitet. Mit der hydrostatischen Grundgleichung und der Gleichung idealer Gase gilt (Beheng, Vorlesungsskript Thermodynamik S. 113):

$$d \ln(p) = -\frac{g(\varphi)}{RT} dz. \quad [2.9]$$

Durch Integration folgt:

$$\ln(p_2) - \ln(p_1) = -\frac{g(\varphi)(z_2 - z_1)}{R\bar{T}} = -\frac{\phi_2 + \phi_1}{R\bar{T}}, \quad [2.10]$$

wobei  $\bar{T}$  der barometrischen Mitteltemperatur der Schicht  $\Delta z = z_2 - z_1$  entspricht und durch

$$\bar{T} = \frac{\Delta z}{\int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{T(z)}} \quad [2.11]$$

definiert ist. Die barometrische Höhenformel ergibt sich zu:

$$p_2 = p_1 \cdot \exp\left(-\frac{g(\varphi)(z_2 - z_1)}{R\bar{T}}\right). \quad [2.12]$$

Zur Berücksichtigung der Feuchte kann die virtuelle Temperatur  $T_v$  eingesetzt werden. Die virtuelle Temperatur ist definiert als die Temperatur, die trockene Luft haben muss, um bei gleichem Druck die gleiche Dichte zu haben wie feuchte Luft. Mit der Einführung der virtuellen Temperatur kann mit der spezifischen Gaskonstante für trockene Luft  $R_l = 287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  gerechnet werden. Die barometrische Höhenformel ergibt sich somit zu:

$$p_2 = p_1 \cdot \exp\left(-\frac{g(\varphi)(z_2 - z_1)}{R_l \bar{T}_v}\right). \quad [2.13]$$

Temperatur- und Feuchtwerte können für die Berechnung aus den Profildaten der Sonden entnommen werden. Für die korrekte Berechnung müssen ein Druckwert  $p(z)$  in einer Höhe  $z$  bekannt sein. Aus den GPS-Daten der horizontalen Sondenbewegung werden die Größen Windrichtung und Windgeschwindigkeit berechnet.

## 2.2 Andere Fallsondensysteme im Vergleich

### 2.2.1 Airborne Vertical Atmosphere Profiling System (AVAPS)

Das Fallsondensystem AVAPS wurde in Zusammenarbeit von NCAR, NOAA und DLR Mitte der 1990er Jahre entwickelt und an Vaisala als Hersteller lizenziert. Es setzt sich aus der Fallsonde Vaisala RD93 und der Empfangseinheit AVAPS MD 11 zusammen. Die Fallsonde besteht aus vier Hauptkomponenten: einem Druck-, Temperatur- und Feuchtemodul (PTU-Modul), einer Mikrocontroller- und Elektronikeinheit, einem GPS-Empfänger und einem 400 MHz-Sender. Der Sondenkörper hat die Form eines Zylinders mit einer Länge von 41 cm und einem Durchmesser von 7 cm. Der Hersteller Vaisala verwendet in der RD93 die Sensoren seiner Radiosonden. Der Temperatursensor ist ein kapazitiver Sensor (Vaisala Thermocap) aus der Vaisala RS80 Radiosonde. Der kapazitive Feuchtesensor (Vaisala H-Humicap) stammt aus der RS92 Radiosonde. Die Heizfunktion des Feuchtesensors, um Benetzen mit Flüssigwasser und Bereifen des Sensors, z.B. beim Durchflug von Wolken zu entfernen, ist bei der RD93 Sonde deaktiviert. Die RD93 hat in mehreren Überarbeitungen einen Kontaminationsschutz ab April 2003 für den Feuchtesensor und Temperatursensor erhalten (Wang, 2005). Der Druckmesser (Vaisala BAROCAP silicon sensor) komplettiert das PTU-Modul. Die Messfrequenz der Sensoren beträgt 2 Hz. Die Sonde erreicht Fallgeschwindigkeiten von  $12 \text{ ms}^{-1}$  in Bodennähe, bei einem Gesamtgewicht von etwa 400 g. Ein Flug aus 12 km Höhe dauert etwa 12 Minuten. Die Empfangseinheit AVAPS MD 11 ist im Flugzeug integriert und empfängt während des Fluges die Daten von bis zu vier fliegenden Fallsonden im meteorologischen Frequenzband. Das System ist mit seiner Abwurfeinrichtung in über 20 Forschungsflugzeugen weltweit eingebaut (Wang, 2005). Seit 1997 ist das AVAPS System im Einsatz bei Forschungsprojekten und im operationellen Einsatz zur Hurrikanbeobachtung bei NOAA. Aktuell wird eine neue Version der Sonde RD94 und AVAPS II entwickelt. Die Herstellerangaben (Vaisala, 2009) für die Vaisala RD93 sind in Tab. 2.6 angegeben.

Die Genauigkeit der Herstellerangaben ist hier auf eine Standardabweichung nach zwei Kalibrierungen unter Laborbedingungen zurückgeführt. Aus Messungen in mehreren Kampagnen wurde die Leis-

tungsfähigkeit des Feuchtesensors der RD93 untersucht (Wang, 2005). Dort wurde festgestellt, dass der Feuchtesensor die Herstellerangabe bei Genauigkeit und der Zeitkonstante nicht erfüllt. Die Zeitkonstante wird aus Messdaten eine Größenordnung größer abgeschätzt als die Herstellerangabe. Dennoch kann dem Feuchtesensor eine gute Leistung bestätigt werden. Franklin und Hock (1999) und Wang (2005) geben die Genauigkeit der RD93 Sonde wie in Tab. 2.7 an.

Tab. 2.6: Sensorspezifikationen des Herstellers aus dem Datenblatt der RD93.

Parameter	Temperatur	Feuchte	Druck	Wind
Typ	kapazitiv	kapazitiv	kapazitiv	GPS
Bereich	-90 °C bis +60 °C	0 % bis 100 % relat. Feuchte	5 hPa bis 1100 hPa	0 ms <sup>-1</sup> bis 200 ms <sup>-1</sup>
Genauigkeit	0.2 K	2 %	0.4 hPa	0.5 ms <sup>-1</sup>
Auflösung	0.1 K	1 %	0.1 hPa	0.1 ms <sup>-1</sup>

Tab. 2.7: Genauigkeit für die Sensoren der RD93 Fallsonde nach Franklin und Hock (1999) und Wang (2005).

Parameter	Genauigkeit
Druck	0.1 hPa
Temperatur	0.2 °C
Feuchte	5 %
Wind	±0.5 ms <sup>-1</sup>

### 2.2.2 Karlsruher Fallsonde

Am Institut für Meteorologie und Klimaforschung des ehemaligen Forschungszentrums Karlsruhe, heute KIT, wurde im Jahr 2000 eine neue Fallsonde entwickelt (Kottmeier et al., 2001), die vor allem für die Untersuchung von atmosphärischen Prozessen wie z.B. Konvektion oder Entstehung von Gewittern eingesetzt wird. Die Fallsonde verwendet teure und besonders genaue Sensoren der Schweizer Radiosonde SRS400 (PTU-Einheit), sowie für die Feuchtemessung ein Taupunktspiegelhygrometer (Meteolabor „Snow White“). Für die Druck- und Höhenmessung wird ein Hypsometer (Ruppert, 1991; Richner et al., 1996) verwendet (Abb. 2.3, links). Über einen integrierten GPS-Empfänger werden Sondenposition, die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit aus der Flugbahn abgeleitet, (Technische Details, siehe Tab. 2.8).

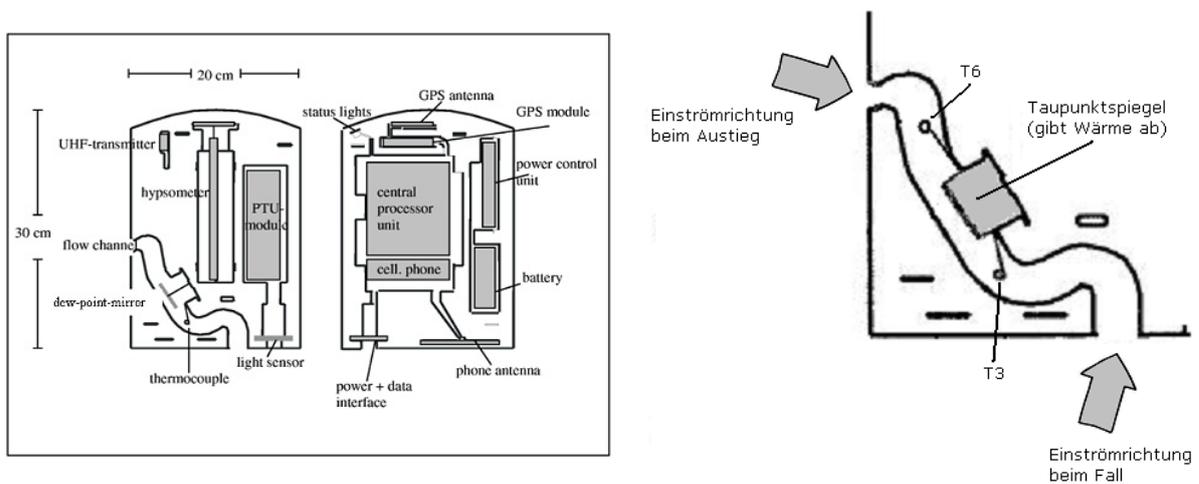


Abb. 2.3: Links: Schematischer Aufbau der Karlsruher Fallsonde. Rechts: Sensoranordnung im Strömungskanal.

Das Konzept der Sonde sieht vor, die Sonden wiederholt einzusetzen und sie nach der Sondierung zu bergen. Da die Sonde keine Daten über eine Funkverbindung an einen Empfänger sendet, sondern nur lokal in der Sonde auf einer Flashkarte speichert, ist zusätzlich ein Mobiltelefon eingebaut, das vor der Landung bis zum Auftreffen am Boden mehrmals eine Textnachricht mit Positionsdaten der Sonde über den Kurznachrichtendienst (SMS) an einen Computer im Institut schickt. Nach der Landung schaltet sich die Sonde ab und aktiviert einen Peilsender, den die Suchmannschaften mit einem Funkempfänger orten können. Durch das robuste Hartschaumgehäuse ist die Messtechnik und Sondenelektronik bei der Landung geschützt. Geborgene Sonden können nach kurzer Wartung und Ladung der Batterien wieder eingesetzt werden. Werden die Sonden nicht mehr gefunden, sind leider auch die gemessenen Daten verloren. Die Karlsruher Fallsonde ist bei den Messkampagnen KONVEX 2000, PRINCE 2006 und COPS 2007 erfolgreich eingesetzt worden. Die Abwürfe wurden mit dem Forschungsflugzeug Dornier Do-128 D-IBUF der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt. Der Vorteil dieses Systems ist, dass die Sonden autark funktionieren und unabhängig von anderen Radiosondensystemen parallel

Tab. 2.8: Sensorspezifikationen der Karlsruher Fallsonde nach Kottmeier et al. (2001).

Parameter	Temperatur	Feuchte	Druck	Wind
Typ	Thermoelement	Taupunktspiegel	Hypsometer	GPS
Bereich	-100 °C bis +50 °C	-100 °C bis +50 °C	5 hPa bis 1100 hPa	
Genauigkeit	< 0.1 K	0.3 K	0.2%	0.5 ms <sup>-1</sup>
Auflösung	0.01 K	0.01 K	0.02%	0.1 ms <sup>-1</sup>

eingesetzt werden können. So könnten beliebig viele Sonden abgeworfen werden, da das eingeschränkte meteorologische Frequenzband (400 MHz bis 406 MHz) nicht genutzt wird. Einsatzbereite Sonden können in schneller Abfolge innerhalb von wenigen Sekunden abgeworfen werden, um eine hohe räumliche Auflösung der Messungen zu erzielen, die bei der Untersuchung von kleinskaligen Wetterphänomenen, wie zum Beispiel Konvektionszellen oder Gewittern von großer Bedeutung ist. Das Sondengehäuse hat die Maße 20 cm\*30 cm\*15 cm, eine Sonde wiegt etwa 950 g (Abb. 2.3, links). Die Temperatursensoren T3 und T6 sowie das Taupunktspiegelhygrometer sind in einem geschwärzten Strömungskanal eingebaut. Der Strömungskanal hat eine S-Form, um eine Kontamination der Sensoren durch Tropfen bei Niederschlag zu verhindern. Die Temperaturen werden mit 63- $\mu$ m Kupfer/55- $\mu$ m Konstantan Thermoelementen gemessen (Abb. 2.3, rechts). Je nach Strömungsrichtung durch den Kanal, wird die Temperaturmessung des Sensors stromauf des Taupunktspiegelhygrometers gespeichert. Das Hypsometer ist für den Einsatz in der Sonde optimiert, um mit hoher Genauigkeit die Temperaturmessung des Siedepunkts von Wasser über die typischen Wertebereiche von Temperatur und Druck während des Einsatzes der Sonde zu gewährleisten. Zusätzlich ist ein Helligkeitssensor für den Wellenlängenbereich 460 nm bis 1080 nm integriert, mit dem Wolkenobergrenzen bestimmt werden können. Eine Modifikation der Karlsruher Fallsonde ermöglicht auch Messungen bei Aufstiegen am Ballon. Durch Anbringen einer Hutze seitlich an der Sonde, wird beim Aufstieg Luft in den Strömungskanal geleitet. In dieser Sondenkonfiguration kann eine maximale Steighöhe (GPS-Höhe) festgelegt werden, in der die Sonde die Verbindung zum Ballon trennt. Nach der Trennung fällt die Sonde als Fallsonde am Fallschirm wieder zu Boden. Die Karlsruher Fallsonde wird in dieser Version für Vergleichsmessungen mit der neuen Fallsonde eingesetzt.

### 2.2.3 Vergleich zum neuen Fallsondensystem

Als Neuentwicklung für das neue Forschungsflugzeug HALO soll das Fallsondensystem die Stärken der beiden oben beschriebenen Systeme kombinieren und als multifunktionales Sondierungssystem in vielen für HALO definierten Forschungsfeldern (DLR, 2001) eingesetzt werden können. Die modulare Ausrichtung des Systems mit einem Abwurfbehälter, der die Messsonden nach dem Abwurf freigibt, ermöglicht es, verschiedene Sensoren, z.B. für Tropfengrößenverteilungen, Wolkenwasser oder Spurengaskonzentrationen, abzuwerfen und ermöglicht dem System so ein breites Anwendungsspektrum für

unterschiedliche Forschungsgebiete. Die Außenmaße des Abwurfbehälters entsprechen denen einer Vaisala RD93 Sonde, sodass die bestehenden Abwurfeinrichtungen des AVAPS ohne Modifikation genutzt werden können. Die Fallsonde ist wie die RD93 als Einmalsonde konzipiert. Gefundene Sonden können je nach Schaden wieder instand gesetzt und erneut verwendet werden. Ein Tausch des Sensorträgers und der Batterien ist möglich. Die Empfangsanlage des neuen Fallsondensystems KITsonde im Flugzeug kann bis zu 30 gleichzeitig aktive Sonden im meteorologischen Frequenzband empfangen. Beim AVAPS können mehr als vier RD93 Sonden nur mit zusätzlichen teuren AVAPS-Empfangsanlagen empfangen werden.

Die Datenverarbeitung speichert die empfangenen Daten und decodiert alle SONDENSIGNALE in Echtzeit. Die Sondierungen können vom Benutzer sofort grafisch dargestellt und verfolgt werden. Nach der Sondierung stehen die Daten fast in Echtzeit für die Bearbeitung, z.B. für die Assimilierung in Wettermodellen oder der Missionsplanung bei großen Feldmesskampagnen zur Verfügung. Das System kann wie das Vaisala System global eingesetzt werden, um bei Messkampagnen gezielte Sondierungen z.B. einer Konvektionszelle mit vielen Sonden mit einer hohen räumlichen Auflösung oder auch in abgelegenen Bereichen der Erde und über den Ozeanen durchzuführen.

Die bisherige Karlsruher Fallsonde (Kottmeier et al., 2001) dagegen ist durch ihr Konzept auf eine mehrfache Verwendung ausgelegt. Da die Daten nur intern gespeichert werden, kann sie nur über Land eingesetzt werden. Sie eignet sich nicht zum Abwurf aus hoch und schnell fliegenden Flugzeugen wie z.B. HALO.

Eine Ausbaustufe des neuen Fallsondensystems sieht die Verbindung der Fallsonden mit einem Satellitenmodem vor, um über eine Satellitenverbindung die Daten direkt an einen Internetserver zu senden. Dort stehen die Daten direkt nach der Sondierung zur Verfügung. Die eingesetzten Fallsonden sind kleiner (31 cm Länge, 2,5 cm Breite, 2 cm Höhe) und leichter ( $>100$  g), als die Fallsonden RD93 (400 g) und Karlsruher Fallsonde (950 g). Dazu bieten sie die Möglichkeit einen zusätzlichen Sensor an die Fallsonde anzuschließen, um neben den Standardgrößen eine Sondierung mit speziellen Sensoren durchzuführen.

Bei Fallsonden ist zu beachten, dass die Fallgeschwindigkeit während der Sondierung nicht konstant ist. Ein Abwurf aus großer Höhe bewirkt durch die geringere Luftdichte und damit einem reduzierten Widerstand eine höhere Fallgeschwindigkeit im oberen Teil der Atmosphäre mit einer zunehmenden Abbremsung durch die steigende Luftdichte. Eine Fallgeschwindigkeit von  $5 \text{ ms}^{-1}$  in Bodennähe wird für die neue Fallsonde angestrebt, dies entspricht in etwa der Steiggeschwindigkeit von Radiosondenballonen.

Ein generelles Problem, das bei Radiosonden und Fallsonden aller Art auftritt, ist die Kontamination der Sensoren durch Kondensieren von Wasserdampf, Bereifen oder Anlagerung von Tropfen bei Niederschlag oder beim Durchfliegen von Wolken. Es tritt dann der Effekt der Verdunstungskühlung am Temperatursensor auf (Wet-Bulb-Effekt), sodass das Temperaturprofil nicht der Wirklichkeit entspricht. Bei Fallsonden tritt dies z.B. direkt unterhalb der Wolkenbasis auf. In gleichem Maße kann der kapazitive Feuchtesensor durch Beschlag durch Wasserdampf oder Tropfen beeinflusst werden. Der Hersteller der

Fallsonde sieht keine Schutzkappe für den Feuchtesensor vor, die aufgrund der Sensorposition u.U. mit Wasser voll laufen und deren Wärmestrahlung die Messung beeinflussen könnte, sondern baut auf eine schnelle Verdunstung der Benetzung der Sensoren.

## 3 Test der Sonden

### 3.1 Labortest in der Klimakammer

Die Fallsonden, die in den folgenden Abbildungen als Dropsonde bezeichnet sind, wurden in der Klimakammer „Heraeus Vötsch Präzisionsklimaprüfschrank VUK 02/500/S“ des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung Karlsruhe in verschiedenen Messzyklen vermessen. In der Klimakammer können die Lufteigenschaften Temperatur und relative Feuchte eingestellt und kontrolliert werden. Die Referenzsensoren in der Klimakammer werden von einem Klimet A30-I von Meteolabor ausgelesen. Das Gerät steuert zyklisch die Datenaufzeichnung der Messfühler und überträgt die Daten an einen Steuercomputer. Das Klimet A30-I misst in einem Zeitraum von fünf Minuten während siebzig Sekunden etwa zehn Einzelwerte von Lufttemperatur, Taupunkt und Luftdruck. Aus den Einzelwerten wird der Mittelwert gebildet und die Standardabweichung bestimmt. Über die Standardabweichung wird die Qualität der Messung kontrolliert, d.h. je kleiner die Standardabweichung, desto genauer bzw. stabiler sind die Eigenschaften Temperatur und Feuchte in der Klimakammer. Der Hersteller Meteolabor empfiehlt eine Zykluszeit von fünf Minuten um eine hohe Genauigkeit zu gewährleisten (Tab. 3.1). Eine Verkürzung des Messintervalls und eine Dauermessung sind möglich, Meteolabor rät aber zugunsten der Genauigkeit davon ab (telefonische Auskunft von Rolf Maag, Meteolabor). Für die Temperaturmessung sind vier Kupfer-Konstantan-Thermoelemente im Innenraum der Klimakammer eingebaut. Sie haben einen Durchmesser von 1.2 mm und reagieren schnell auf Temperaturänderungen. Die Einzeltemperaturen aller vier Thermoelemente werden gemittelt und mit der zugehörigen Standardabweichung übertragen. Zur Messung der Feuchte ist ein Taupunktspiegelhygrometer eingebaut. Das Hygrometer ist mit einem Mechanismus zur Spiegelreinigung ausgestattet. Damit wird eine gleichbleibende Qualität der Messungen erreicht. Aus den Temperatur- und Taupunktmessungen wird die relative Feuchte berechnet. Ein Drucksensor komplettiert die Sensoren des Klimet A30-I. Über einen Steuercomputer kann mit einem

Tab. 3.1: Technische Details des Klimet A30-I:

Parameter	Einsatzbereich	Auflösung	Genauigkeit
Temperatur	0 °C bis 40 °C	0.001 °C	±0.08 °C
Taupunkt	-20 °C bis 60 °C	0.001 °C	±0.15 °C
Relative Feuchte	4 % bis 100 %	0.01 %	±0.5 %
Luftdruck	600 hPa bis 1060 hPa	0.001 hPa	±0.2 hPa

LabVIEW-Programm die Klimakammer bedient werden. Parameter für die Standardabweichung (Genauigkeit), Messrampen (Einstellungen von Temperatur und Feuchte), Messzeit (Anzahl der Messungen mal 5 Minuten) und die Konfiguration des Klimet A30-I können mit dem Programm eingestellt werden. Über die serielle Schnittstelle steuert das Programm entsprechend der eingestellten Messrampen die Temperatur und Feuchte in der Klimakammer. Nach der Einregelungsphase auf eine Messrampe, d.h. auf eine bestimmte Temperatur und Feuchte, werden Messungen im fünf Minuten Zyklus durchgeführt. Über die Standardabweichung wird die Genauigkeit der gewünschten Messparameter kontrolliert. Unterschreitet der Wert der Standardabweichung einen vorher festgelegten Genauigkeitsgrenzwert schaltet das Programm in den Messmodus und misst die aktuelle Messrampe entsprechend der gewählten Messzeit. Eine Modifizierung des Steuerprogramms erlaubt zudem die Datenspeicherung außerhalb des Messmodus. Die gespeicherten Daten enthalten einen Zeitstempel, die Mittelwerte der vier einzelnen Temperaturfühler, der Gesamtmittelwert alle Temperatursensoren, den Mittelwert des Taupunkts und der errechneten relativen Feuchte und einen Druckwert, jeweils mit Standardabweichung. Die Messungen in der Klimakammer wurden auf zwei Arten durchgeführt:

- Manuell: Messreihen wurden mit einer manuellen Vorgabe der Temperatur- und Feuchtwerte durchgeführt. Der Steuercomputer wurde hierbei nur zur Datenaufzeichnung genutzt.
- Vollautomatisch: Messreihen wurden automatisiert über das Steuerprogramm geregelt. Das Steuerprogramm wurde zuvor mit den Temperatur- und Feuchtesequenzen, Genauigkeiten und Messzeiten konfiguriert.

Die Messzeit für eine Messrampe betrug jeweils eine Stunde. Dies entspricht zwölf Werten der Klimet-Messungen pro Stunde und Messrampe. Die Fallsonden wurden für die Messungen in der Mitte der Klimakammer platziert. Die Funksignale der Sonden wurden mit drei GRAW-Empfängern mit einer 400 MHz-Antenne außerhalb der Klimakammer und einem ICOM-Handempfänger mit einer selbst angefertigten  $\lambda/4$ -Antenne innerhalb der Klimakammer empfangen. Die empfangenen Signale wurden mit der Software GRAWMet gespeichert und liegen als Rohdaten vor. Vor der Messung wurden die Fallsonden initialisiert und mit einer externen Stromversorgung in der Klimakammer möglichst nahe beieinander platziert. Zum Schutz der Sonderelektronik erhielten die Sonden eine Styroporisolierung. Das Klimakammergehäuse beeinträchtigte das Funksignal zu den Antennen außerhalb der Kammer, dennoch war das Signal ausreichend stark, um die Messungen durchführen zu können. Es fiel auf, dass mehr Daten nicht oder falsch decodiert wurden als dies bei normalen Gebrauch in der Atmosphäre der Fall ist. Typische Ausfallwerte (-99.0 oder 0.0) tauchten in den Sondendaten auf, die bei der Auswertung der Daten durch einen neutralen Ausfallwert Not-A-Number (NaN) ersetzt und nicht berücksichtigt wurden. Die GRAW-Software bewertet die Signalqualität auf einer Skala von 0.0 bis 1.0. Bei Messungen in der Klimakammer lagen die Werte der Signalqualität zwischen 0.6 und 0.7 beim Empfang mit Antennen außerhalb der Klimakammer. Die kleinere  $\lambda/4$ -Antenne wurde bei Messungen innerhalb der Klimakammer angebracht. Mit dieser Antenne war die Signalqualität mit 0.9 sehr gut und erreichte damit die gleichen

Werte, wie sie bei Aufstiegen in der Atmosphäre üblich sind. Bei dieser guten Signalqualität waren auch deutlich weniger Ausfallwerte in den Daten zu finden. Der GPS-Empfang war bei den Klimakammermessungen nicht nötig, daher wurde auf den Aufbau der GPS-Antennen an den Empfängern verzichtet. Mit den verfügbaren Empfängern war ein gleichzeitiger Empfang von bis zu vier Sonden möglich.

Mit den Messungen in der Klimakammer wurde die Genauigkeit der Fallsonde unter Laborbedingungen bestimmt. Die eingebauten Sensoren der Klimakammer wurden aufgrund ihrer hohen Genauigkeit als Referenz gewählt. Die Messungen sollten auch zeigen, ob es Unterschiede zwischen der neuen Fallsonde und einer DFM06 Radiosonde gibt. Für den Vergleich wurden die folgenden Temperatur- und Feuchtezyklen durchfahren.

- Messung einer Temperatursequenz von  $-10\text{ °C}$  bis  $40\text{ °C}$  in trockener Luft
- Variation der Feuchte bei einer konstanten Temperatur von  $20\text{ °C}$
- Dauertests mit einer Temperatursequenz und variabler Feuchte
- Vergleichsmessung von Vorserie und Produktionsserie der Fallsonden mit einer Temperatursequenz in feuchter Luft

### 3.1.1 Temperatursequenz in trockener Luft

Als erste Testreihe in der Klimakammer wurde eine Temperatursequenz in trockener Luft aufgenommen. Die Temperatursequenz wurde manuell am Schaltschrank der Klimakammer eingestellt, der Steuercomputer speicherte lediglich die Daten des Klimet A30-I. Als Temperatursequenz wurde in  $5\text{ °C}$ -Schritten zwischen  $-10\text{ °C}$  und  $+40\text{ °C}$  gemessen. Die Feuchte wurde am Schaltschrank der Klimakammer auf  $5\%$  relative Feuchte eingestellt. Jede Temperaturstufe wurde eine Stunde lang vermessen. Die Einstellzeit auf die Temperatur wurde großzügig bemessen und die Temperaturstabilität anhand der Standardabweichung der Klimet-Temperaturdaten überprüft. In der ersten Testreihe wurden die Fallsonde Nr. 903926 und eine GRAW Radiosonde DFM06 Nr. 719385 zusammen getestet. Die Sondendaten wurden zur Auswertung in Matlab eingelesen. Mit Hilfe von Übersichtsdarstellungen wurden Ausfallwerte und falsch decodierte Werte in den Sondendaten manuell durch NaNs ersetzt. Über die Zeitstempel der Klimet- und Sondendaten wurden für den gleichen Zeitraum von einer Stunde Mittelwerte und Standardabweichung von Temperatur und relativer Feuchte berechnet. Für den Vergleich zur Referenz wurde die Abweichung der Mittelwerte der Sonden zu den Klimet-Mittelwerten berechnet.

Die Abb. 3.1 zeigt den Verlauf der Testsequenz und die Abweichungen von der Referenz. Die Stundenmittelwerte sind als Punkte mit den Standardabweichungen als Fehlerbalken dargestellt, die jedoch aufgrund der Güte der Messung kaum sichtbar sind. Die Abweichungen der DFM06 Radiosonde von der Referenz sind bei niedrigen Temperaturen am größten ( $-0.38\text{ K}$  bei  $0\text{ °C}$ ). Mit zunehmender Temperatur nimmt die Abweichung von der Referenz ab, die Abweichung beträgt bei  $40\text{ °C}$  noch  $-0.1\text{ K}$ . Die Fallsonde zeigt über die Messreihe den gleichen Verlauf der Abweichungen wie die Radiosonde, groß

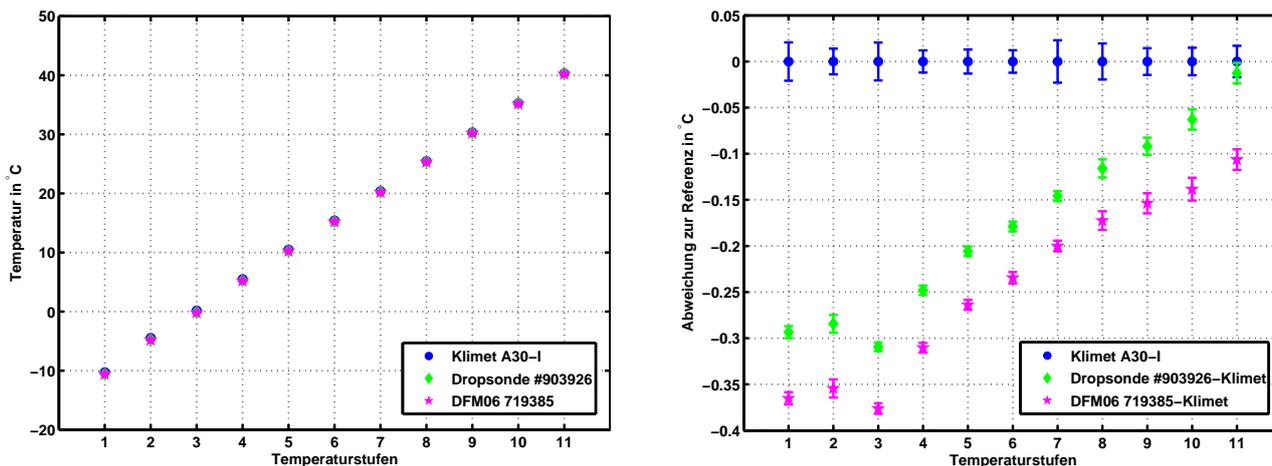


Abb. 3.1: Links: Temperatursequenz von -10 °C bis +40 °C, die Standardabweichungen sind kaum sichtbar. Rechts: Abweichung der Sondenmittelwerte von der Referenz Klimet A30-I.

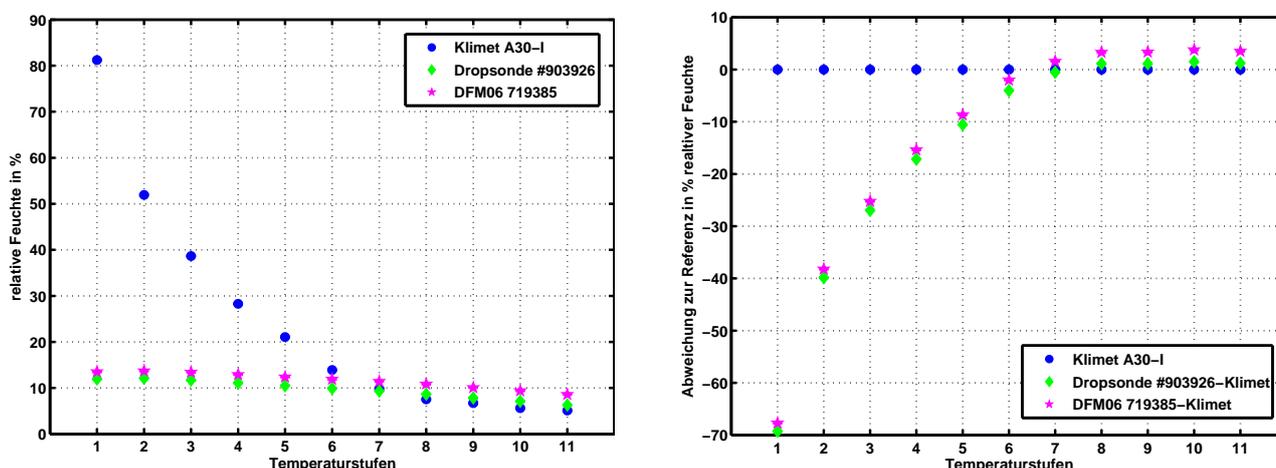


Abb. 3.2: Links: Der Feuchteverlauf zur Temperatursequenz zwischen -10 °C bis +40 °C. Rechts: Abweichung der Sondenmittelwerte von der Referenz Klimet A30-I.

bei niedrigen Temperaturen ( $\approx 0.31$  K bei  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und abnehmend bei höheren Temperaturen ( $0.01$  K bei  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Ab der Temperaturstufe 5 bei  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  misst die Fallsonde innerhalb der Sensorgenauigkeit mit einer Abweichung von  $0.2$  K von der Referenz. Bei Temperaturen unter  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ist die Abweichung größer als die Sensorgenauigkeit und somit nicht befriedigend. Dass die Ursache für diese Differenzen nicht in den Inhomogenität der Luft in der Klimakammer liegen kann, zeigen die Daten der vier Thermoelemente, deren geringen Abweichungen von zum Teil deutlich weniger als  $0.01$  K der vier Thermoelemente untereinander eine homogene Luft in der Kammer bestätigen. Die Fallsonde misst geringere Abweichungen von der Referenz als die Radiosonde, im Mittel sind die Werte etwa  $0.07$  K höher als die der Radiosonde. Für meteorologische Messungen ist dieser Temperaturunterschied aber vernachlässigbar. Beide Sonden messen demnach die gleiche Temperatur und zeigen die größten Abweichungen von der Referenz bei den tiefsten Temperaturen. Die Standardabweichungen der Temperaturmessungen der Referenz und der

Sonden sind gering und liegen sogar im Bereich der Sensorauflösung von 0.01 K. Dies belegt zudem die gute Temperaturregelung der Klimakammer. Die Temperaturmessung zeigt deutliche Abweichungen von der Referenz vor allem bei tiefen Temperaturen, bei der die Abweichung der Sensoren von der Referenz außerhalb der angegebenen Sensorgenauigkeit von 0.2 K liegt.

Die Messung der relativen Feuchte (Abb. 3.2) zeigt einen ähnlichen Verlauf für die beiden Sonden. Die Abweichung zwischen beiden Sonden beträgt im Mittel etwa 2 % relative Feuchte, wobei die Fallsonde einen niedrigeren Feuchtwert misst. Mit der Einstellung von 5 % relative Feuchte als Vorgabe regelt die Klimakammer an ihrer Leistungsgrenze vor allem bei negativen Temperaturen. Der eingestellte Feuchtwert wird von keiner Sonde gemessen. Die Referenzmessung des Taupunktspiegels ist hier mit Vorsicht zu interpretieren. Der Taupunkt liegt bei dieser Messreihe bis zur siebten Temperaturstufe außerhalb seines Arbeitsbereichs. Den Messungen kann daher in den ersten sechs Temperaturstufen nicht vertraut werden. Von der siebten bis zur elften Temperaturstufe nehmen die gemessenen Feuchtwerte für Referenz und Sonden ab, mit den geringsten Feuchtwerten bei 40 °C. Dieses Verhalten kann durch die Steuerung der Klimakammer erklärt werden, die die trockene Luft weiter erwärmt, wodurch der Wert der relativen Feuchte weiter abnimmt. Die beiden Sonden messen ab der siebten Temperaturstufe eine im Vergleich zur Referenz höhere Feuchte. Die Fallsonde hat wie bei der Temperatur eine geringere Abweichung von der Referenz als die DFM06 Radiosonde. Die Fallsonde hat eine Abweichung von etwa 1.2 % relative Feuchte von der Referenz, die DFM06 Radiosonde misst eine Abweichung von 3.5 % relative Feuchte von der Referenz. Damit liegt die Fallsonde im Bereich der Genauigkeit des Feuchtesensors. Die Abweichung der Radiosonde ist größer als die angegebene Sensorgenauigkeit von 2 % relative Feuchte. Die Messreihe zeigt, dass insbesondere niedrige Feuchtwerte gut gemessen werden können.

Tab. 3.2: Stundenmittelwerte der Temperatur in °C von Klimet A30-I, Fallsonde und Radiosonde, jeweils mit Standardabweichung.

Temperaturstufe	Klimet A30-I	Fallsonde Nr. 903926	Radiosonde DFM06
1	-10.26 ±0.02	-10.55 ±0.01	-10.63 ±0.01
2	-4.46 ±0.01	-4.74 ±0.01	-4.81 ±0.01
3	0.19 ±0.02	-0.12 ±0.01	-0.19 ±0.01
4	5.50 ±0.01	5.25 ±0.01	5.19 ±0.01
5	10.50 ±0.01	10.29 ±0.01	10.24 ±0.01
6	15.43 ±0.01	15.25 ±0.01	15.19 ±0.01
7	20.40 ±0.02	20.25 ±0.01	20.19 ±0.01
8	25.48 ±0.02	25.37 ±0.01	25.31 ±0.01
9	30.35 ±0.01	30.26 ±0.01	30.20 ±0.01
10	35.28 ±0.01	35.22 ±0.01	35.14 ±0.01
11	40.30 ±0.02	40.29 ±0.01	40.20 ±0.01

Tab. 3.3: Stundenmittelwerte der relativen Feuchte in % von Klimet A30-I, Fallsonde und Radiosonde, jeweils mit Standardabweichung.

Temperaturstufe	Klimet A30-I	Fallsonde Nr. 903926	Radiosonde DFM06
1	81,21 ±0,09	11,95 ±0,06	13,50 ±0,05
2	51,93 ±0,09	12,09 ±0,06	13,71 ±0,05
3	38,65 ±0,09	11,70 ±0,02	13,41 ±0,03
4	28,26 ±0,06	11,10 ±0,01	12,90 ±0,03
5	21,05 ±0,06	10,50 ±0,02	12,38 ±0,04
6	13,91 ±0,06	9,90 ±0,03	11,90 ±0,02
7	9,85 ±0,15	9,34 ±0,06	11,41 ±0,03
8	7,54 ±0,12	8,66 ±0,06	10,83 ±0,05
9	6,72 ±0,17	7,84 ±0,09	10,07 ±0,05
10	5,61 ±0,10	7,01 ±0,05	9,39 ±0,03
11	5,10 ±0,09	6,30 ±0,00	8,60 ±0,01

### 3.1.2 Dauertests mit variabler Feuchte

In zwei Dauertests wurden Temperatursequenzen zwischen 0 °C und 40 °C vermessen. Die Steuerung bei diesen Tests lief vollautomatisch über den Steuercomputer der Klimakammer. Die Feuchte wurde der Temperatursequenz so angepasst, dass die Luft von feucht kalter zu trocken warmer Luft geregelt wurde. Diese Temperatur- und Feuchteregelung ist für die Klimakammer von Vorteil, da sie für die nächste Temperaturstufe meist nur die Luft erwärmen oder abkühlen muss und nicht noch zusätzlich die Luft befeuchten oder trocknen muss. Die Umschaltung in den Messmodus war nur über die Temperaturstandardabweichung mit einer Genauigkeit von 0.1 °C eingestellt, da die Feuchteregelung sehr träge reagiert. Die Messdaten zeigen in einzelnen Fällen, dass das Temperaturkriterium zur Schaltung in den Messmodus erreicht wurde und erst dann die Feuchte nachgeregelt wurde. In diesen Fällen kommt es bei der Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Sonden zu größeren Abweichungen von der Referenz, da die Sonden die Einregelung der Feuchte kontinuierlich messen, während die Klimet-Messungen nur wenige Messpunkte in einem Fünfminutenintervall für die Berechnung aufnehmen, siehe bei den Temperaturstufen 3, 10, 11, 12 und 14 im ersten Dauertest (Abb. 3.4) und bei den Temperaturstufen 5, 6 und 11 im zweiten Dauertest (Abb. 3.6). Bei der Auswertung wurde versucht die Einregelungsphase der Feuchte nicht zu berücksichtigen und nur Mittelwerte einer konstanten Feuchte zu berechnen. Bei den genannten Temperaturstufen war das Feuchtesignal während der einstündigen Messzeit nicht eingeregelt. Dadurch kommt es bei der Berechnung der Mittelwerte zu einer großen Standardabweichung.

Der erste Dauertest umfasste 18 Temperaturstufen zwischen 10 °C und 40 °C und wurde mit zwei Fallsonden und einer DFM06 Radiosonde durchgeführt (Abb. 3.3, links). Durch einen Rechnerabsturz eines Empfängers kurz nach dem Beginn der Messungen waren keine Messdaten der Fallsonde Nr. 903926 für die Auswertung brauchbar und wurde darum von der Auswertung des ersten Dauertests ausgeschlossen.

Die Temperaturmessung zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen den Sonden und der Klimet-Messung. Die Abweichungen von der Referenz liegen immer innerhalb der Sensorgenauigkeit und sind kleiner als 0.15 K. Die Abweichungen werden mit zunehmender Temperatur größer und erreichen bei der höchsten Temperatur die größte Abweichung. Dieses Sensorverhalten lässt auf eine fehlerhafte oder ungenaue Kalibrierung schließen. Die mittlere Abweichung der Fallsonde Nr. 903927 von der Referenz ist etwa 0.05 K. Ab Temperaturen von +25 °C liegen die Messwerte über der mittleren Abweichung, bei Temperaturen unter 20 °C liegen die Messwerte unter der mittleren Abweichung. Die Ausgleichsfunktion der Kalibrierung von GRAW hat demnach eine zu große Steigung. Die Fallsonde misst wie im ersten Temperaturtest um etwa 0.08 K höhere Temperaturen als die Radiosonde DFM06. In dieser Messreihe sind die Abweichungen der Radiosonde von der Referenz im Vergleich zur Fallsonde kleiner. Die Radiosonde misst meist geringere Temperaturen als die Referenz, während die Fallsonde etwas höhere Werte als die Referenz misst. Die mittlere Abweichung der DFM06 Radiosonde von der Referenz ist 0.03 K. Die Schwankungen um die mittlere Abweichung zeigen das gleiche Verhalten wie

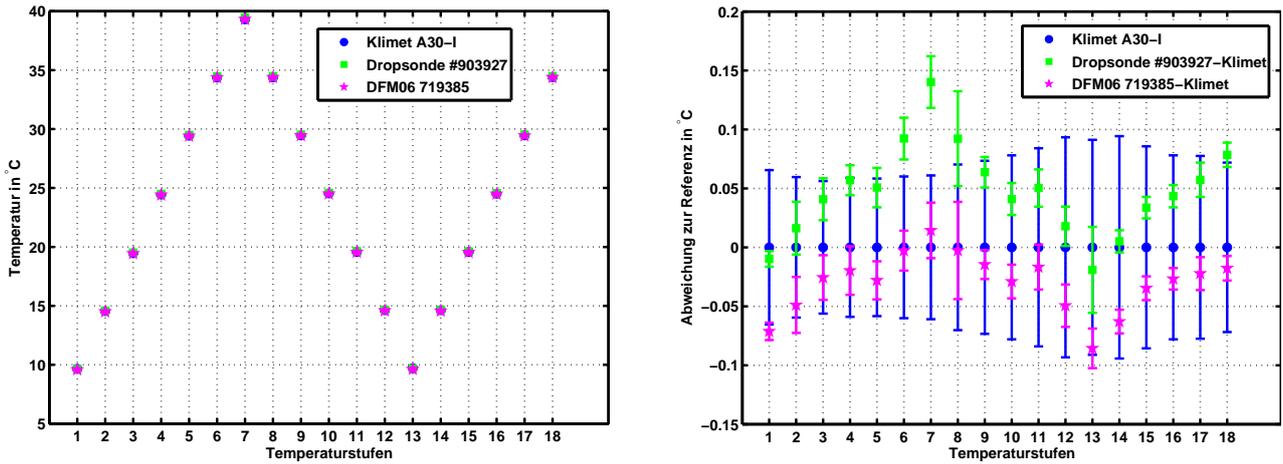


Abb. 3.3: Links: Temperatursequenz von 10 °C bis 40 °C, die Standardabweichungen sind kaum sichtbar. Rechts: Abweichung der Sondenmittelwerte von der Referenz Klimet A30-I.

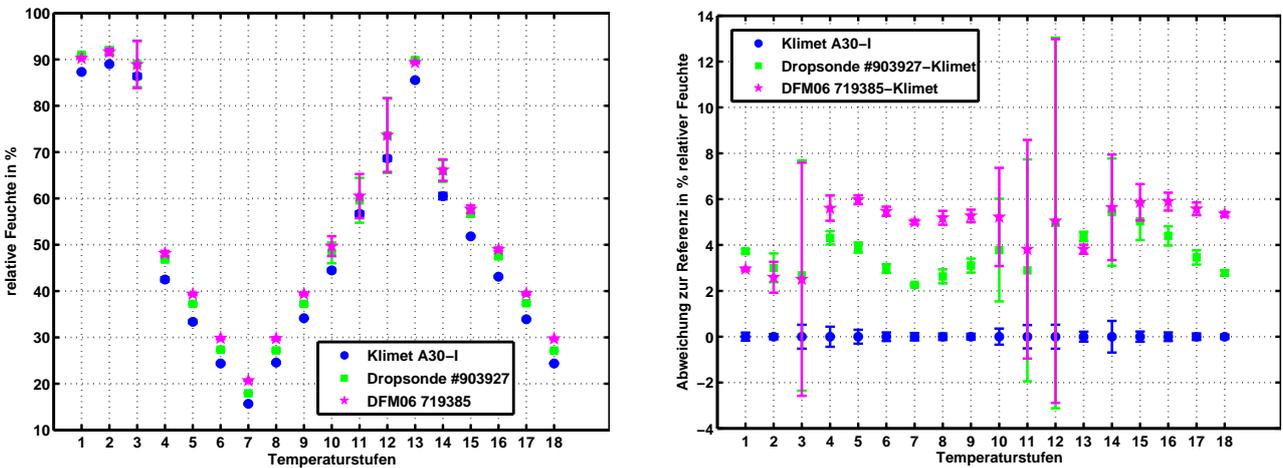


Abb. 3.4: Links: Der Feuchteverlauf zur Temperatursequenz zwischen 10 °C bis 40 °C. Rechts: Abweichung der Sondenmittelwerte von der Referenz Klimet A30-I.

das der Fallsonde. Auch hier kann man auf eine ungenaue Kalibrierung seitens des Sondenherstellers schließen. Die Steigung der Ausgleichsfunktion ist zu groß. Grundsätzlich ist die Temperaturmessung beider Sonden sehr gut, die Abweichungen von der Referenz liegen deutlich innerhalb der Sensorgenauigkeit.

Die Feuchtesequenz umfasste einen Bereich von 15 % bis 90 % relative Feuchte (Abb. 3.4, links). Die Feuchte nimmt mit zunehmender Temperatur ab. Beide Sonden messen einen höheren Feuchtwert als die Referenz, wobei anzumerken ist, dass die Position des Taupunktspiegels der Klimakammer nicht mit der Sensorposition der Sonden übereinstimmt. Durch die homogene Temperaturverteilung in der Kammer und die sehr gute Durchmischung durch den großen Ventilator kann man aber von einer homogenen Verteilung der Feuchte im Messraum ausgehen. Bei Messrampen mit guter Feuchterege- lung der Klimakammer sind die Standardabweichungen der Sonden und der Klimakammer von gleicher Größenordnung

und meist kleiner 0.1 % relative Feuchte. Bei den Messrampen mit verzögerter und langsamerer Feuchterege- lung nehmen die Standardabweichungen der Sonden stark zu (Temperaturstufe 12, Abb. 3.4, rechts). Die Fallsonde hat eine mittlere Abweichung von der Referenzmessung von 3.6 % relative Feuchte. Dies liegt außerhalb der Sensorgenauigkeit, die mit 2 % vom Hersteller angegeben wird (Tab. 2.2). Eine An- passung der Mittelung an das Feuchtesignal bringt zwar eine Verbesserung, bei den Temperaturstufen 3, 10, 11, 12 und 14 war der Feuchteverlauf über die Messzeit jedoch nicht ausreichend konstant, um einen Mittelwert mit kleiner Standardabweichung zu berechnen. Die Abweichungen sind teilweise durch die langsamere Feuchterege- lung beeinflusst und daher als etwas zu hoch einzuschätzen. Die Messungen der Fallsonde zeigen tendenziell eine Unterschätzung der relativen Feuchte in trockener Luft <40 % relati- ve Feuchte. Eine Überschätzung der Feuchte für einen bestimmten Feuchtebereich lässt sich aus dieser Messung nicht ableiten. Die Radiosonde DFM06 misst im Mittel eine um 4.8 % höhere relative Feuchte als die Referenz. Die DFM06 Radiosonde zeigt bei dieser Messung ein anderes Verhalten als die Fallson- de. Messungen >60 % relative Feuchte liegen etwas unter der mittleren Abweichung von der Referenz, Messungen <60 % relative Feuchte liegen über der mittleren Abweichung.

Die Messwerte beider Sonden weichen im Vergleich zu ihrer mittleren Abweichung nicht mehr als 2 % relative Feuchte ab. Diese Abweichungen zeigen den eigentlichen Sensorfehler an. Die Sensoren erfüllen also die Sensorgenauigkeit während der Messung, aber mit einer konstanten Abweichung von der Referenz (Fallsonde Nr.903927: 3.6 % relative Feuchte und DFM06 Nr. 719385: 4.8 % relative Feuchte). Durch eine bessere Kalibrierung könnte diese mittlere Abweichung reduziert werden.

Die Feuchtemessungen beider Sonden haben eine mittlere Abweichung von der Referenz, die grö- ßer ist als die angegebene Sensorgenauigkeit von 2 % relative Feuchte und sind für Labormessungen nicht gut. Andererseits werden Genauigkeiten anderer Feuchtesensoren von Radiosonden wie der Vaisala RS92 oder der Fallsonde RD93 mit einer Genauigkeit von 5 % abgeschätzt (Wang, 2005). Es zeigten sich also ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen den Herstellerangaben und dem Einsatz in der Pra- xis. Die WMO gibt für Feuchtemessungen in der höheren Atmosphäre eine Genauigkeit von 5 % relative Feuchte an (WMO (2008), Part I, Chapter 12, Annex 12.A). Der Radiosondenvergleichstest der WMO in Mauritius zeigt bei den besten Feuchtesensoren der Radiosonden Vaisala RS92, Sippican und „Snow White“-Taupunktspiegelhygrometer eine Übereinstimmung von  $\pm 2$  % relative Feuchte. Dies stellt eine deutliche Verbesserung zu früheren Vergleichstests dar (Jeannet et al., 2008). Die Feuchtemessung in der Atmosphäre und speziell bei Radiosonden oder Fallsonden ist eine Herausforderung, da mit kleinen und günstigen Sensoren eine gute Genauigkeit erreicht werden muss. Die Leistungsfähigkeit der Feuchte- sensoren ist speziell bei bewegten Messträgern wie Radiosonden oder Fallsonden gefordert. Die derzeit verwendeten kapazitiven Feuchtesensoren haben aber eine variable Zeitkonstante, die von der Tempera- tur abhängig ist (siehe Tab. 2.3), zudem wird die Messung auch stark von der Kalibrierung beeinflusst. Bei diesen preiswerten Sensoren ist eine Einzelkalibrierung durch den Sondenhersteller notwendig, die über die Qualität der Messung entscheidet. Weitere Fehlerquellen sind Benetzen oder Bereifen der Sen- soren.

Der zweite Dauertest wurde mit einer Temperatursequenz zwischen 0 °C und 40 °C durchgeführt (Abb. 3.5). Der Feuchteverlauf entsprach dem des ersten Dauertests, von trocken warm zu feucht kalt. Die bei den Temperaturmessungen erzielten Ergebnisse liegen wiederum innerhalb der Sensorgenauigkeit. Wie in den vorigen Tests messen die Fallsonden über die gesamte Messreihe eine etwas höhere Temperatur als die DFM06 Radiosonde, wobei die beiden Fallsonden (Nr. 903926 und Nr. 903927) mit nur sehr geringen Abweichungen die gleichen Temperaturmesswerte liefern. Die Abweichung der Sonden untereinander liegt innerhalb der Sensorgenauigkeit. Beide Fallsonden haben während des gesamten Dauertests eine Abweichung von der Referenz von  $\pm 0.1$  K. Auffällig in diesem Test ist aber, dass die Temperaturmessung der Fallsonden nicht wie zuvor konstant höhere Temperaturen als die Referenz liefert. Die mittlere Abweichung von der Referenz über die gesamte Messung ist mit  $< 0.01$  K vernachlässigbar. Wie im ersten Dauertest zeigen sich Schwankungen um die mittlere Abweichung, die innerhalb der Sensorgenauigkeit liegen (Abb. 3.5, rechts). Die größten positiven Abweichungen von  $+0.1$  K finden sich bei der höchsten Temperatur bei 40 °C, die größten negativen Abweichungen von  $-0.1$  K bei der niedrigsten Temperatur bei 0 °C. Temperaturen über  $+20$  °C werden zu hoch, Temperaturen unter  $+20$  °C etwas zu niedrig gemessen. Mit einer linearen Annahme ist die Steigung der Kalibrierfunktion um 0.5 % größer als die ideale Steigung eins. Damit bestätigt sich das Ergebnis des ersten Dauertests. Die Kalibrierung ist in dem gemessenen Temperaturbereich in der Klimakammer aber ein guter Kompromiss. Eine Extrapolation auf weitere Temperaturbereiche ist nicht möglich, da die Kalibrierfunktion von GRAW, ein Polynom 5. Grades, nicht bekannt ist und besonders tiefe Temperaturen  $< -10$  °C nicht in der Klimakammer vermessen wurden. Die lineare Annahme ist über einen größeren Temperaturbereich daher möglicherweise nicht mehr gültig. Der Hersteller GRAW zeigt durch die vernachlässigbaren Abweichungen zwischen beiden Fallsonden, dass seine Kalibrierung der Sensoren gut funktioniert. Die DFM06 Radiosonde misst wie zuvor geringere Temperaturen als die Referenz mit einer mittleren Abweichung von 0.08 K. Auch bei der Radiosonde bleiben die Abweichungen innerhalb der Sensorgenauigkeit. Die DFM06 Messungen zeigen die gleichen Schwankungen um die mittlere Abweichung wie die Fallsonden. Die größte positive Abweichung von 0.08 K liegt bei 40 °C, die größte negative Abweichung von etwa 0.1 K bei 0 °C. Mit einer linearen Annahme ergibt sich eine um 0.43 % größere Steigung als die ideale Steigung.

Die Feuchtemessung zeigt bei den Temperaturstufen 5, 6 und 11 durch die träge Feuchterege- lung drei Werte mit großer Abweichung von der Referenz und gleichzeitig großer Standardabweichung (Abb. 3.6, rechts). Im Mittel weichen alle Sonden jedoch weniger als 5 % relative Feuchte von der Referenz ab. Die Fallsonde Nr. 903926 zeigt die geringste mittlere Abweichung von  $+3.4$  % relative Feuchte, die Fallsonde Nr. 903927 zeigt eine mittlere Abweichung von  $+3.8$  % relative Feuchte, die DFM06 Radiosonde  $+4.6$  % relative Feuchte. Die Sonden liegen im Vergleich zur Referenz alle außerhalb der angegebenen Sensorgenauigkeit, aber noch innerhalb der WMO-Vorgaben. Die Standardabweichungen der Feuchte sind in beiden Dauertests, bis auf die Temperaturstufen 3, 10, 11 und 12 im ersten und 5, 6, 11 im zweiten Dauertest, klein. Die geringe Standardabweichungen zeigen eine konstante Feuchte in der Klimakammer und damit eine gute Messung der Feuchte. Betrachtet man wie im ersten Dauertest die

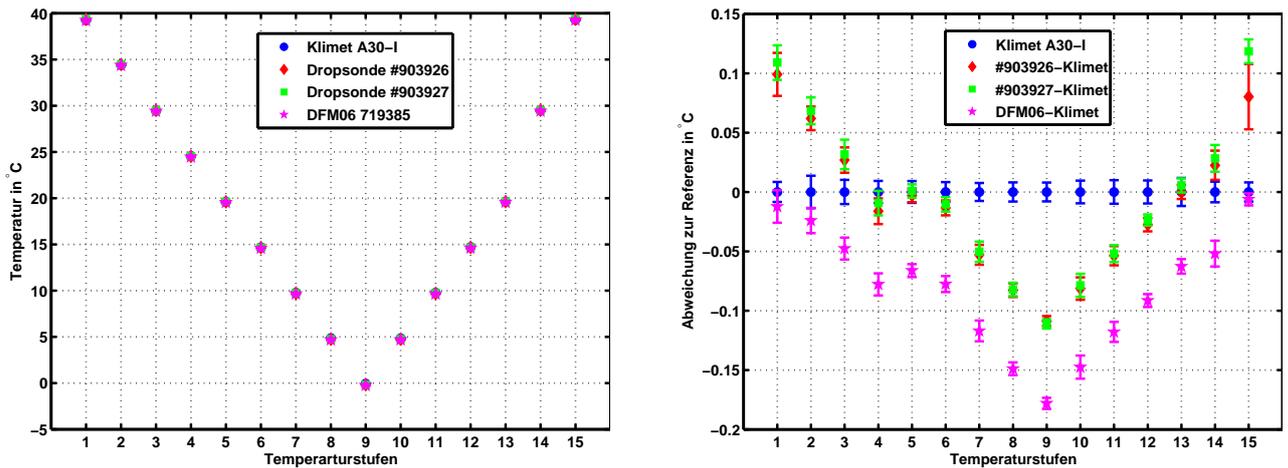


Abb. 3.5: Links: Temperatursequenz von 10 °C bis 40 °C, die Standardabweichungen sind kaum sichtbar. Rechts: Abweichung der Sondenmittelwerte von der Referenz Klimet A30-I.

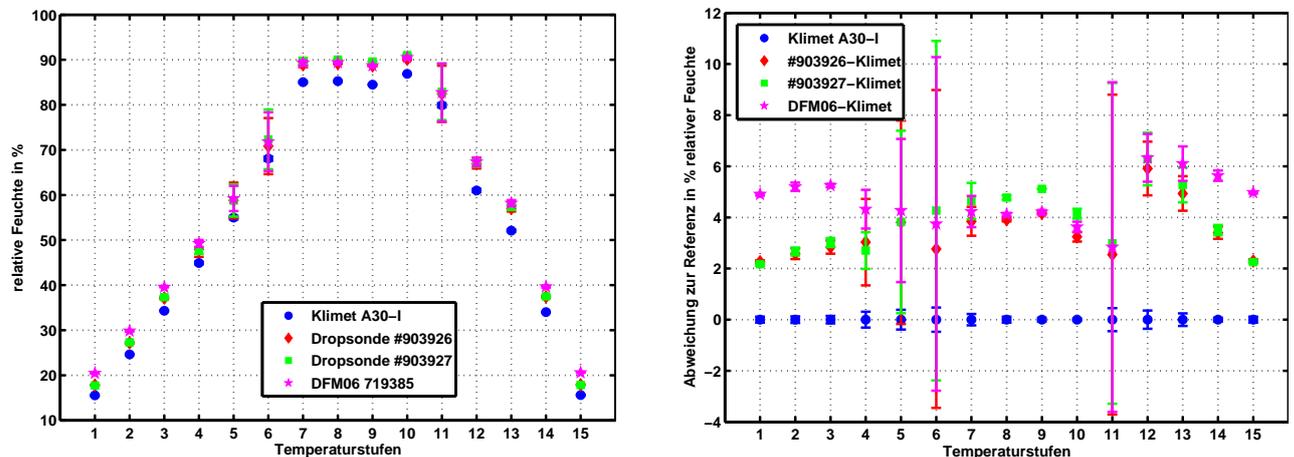


Abb. 3.6: Links: Der Feuchteverlauf zur Temperatursequenz zwischen 10 °C bis 40° C. Rechts: Abweichung der Sondenmittelwerte von der Referenz Klimet A30-I.

Abweichungen der Messwerte zur mittleren Abweichung der Sensoren, ergibt sich das gleiche Ergebnis wie beim ersten Dauertest. Die Messwerte weichen nicht mehr als 2 % relative Feuchte von der mittleren Abweichung ab und liegen somit innerhalb der Sensorgenauigkeit. Im Vergleich zur Referenz haben die Sonden eine Abweichung zwischen 3.4 % und 4.6 % relative Feuchte. Die mittlere Abweichung der GRAW-Sonden von der Referenz mit etwa 4 % relative Feuchte zeigt einen Kalibrierfehler auf. Die Abweichungen von der mittleren Abweichung zeigen für jede Sonde einen nichtlinearen Sensorfehler, der aber innerhalb der angegebenen Sensorgenauigkeit liegt. Mit einer besseren Kalibrierung könnte daher die mittlere Abweichung reduziert und die Messgenauigkeit erheblich verbessert werden.

### 3.1.3 Feuchtesequenzen

In zwei weiteren Testreihen wurden zwei gleiche Feuchtesequenzen bei konstanter Temperatur gemessen. Die Feuchte wurde dazu am Schaltschrank der Klimakammer manuell eingestellt. Die Feuchtesequenz umfasste fünf verschiedenen Feuchtwerte, wobei die Temperatur auf 20 °C eingestellt wurde. Für die Stabilisierung auf einen Feuchtwert wurde großzügig Zeit eingeräumt. Die Messdauer pro Feuchtestufe betrug, wie bei den anderen Messungen, eine Stunde. Gezeigt werden in der Abb. 3.7 die Mittelwerte und die Abweichung zum Mittelwert mit Fehlerbalken. Die berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen zeigt Tab. 3.5.

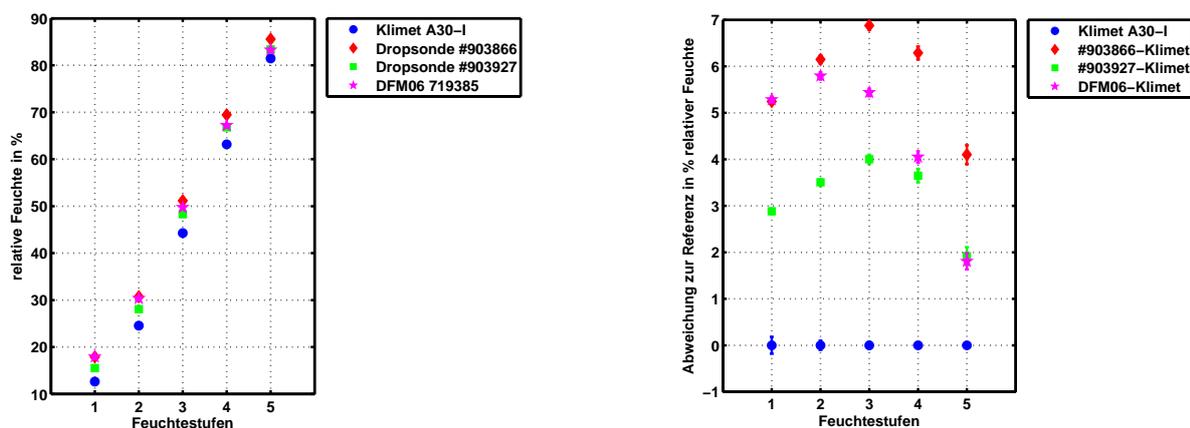


Abb. 3.7: Links: Fünfstufige Feuchtesequenz mit Stundenmittelwerten und Fehlerbalken. Rechts: Abweichung der Sondenmittelwerte von der Referenz Klimet A30-I.

Alle Sonden messen in allen Feuchtestufen eine höhere Feuchte als die Referenz. Die Fallsonde Nr. 903927 hat die im Mittel geringste Abweichung mit 3.2 % relative Feuchte von der Referenz. Die zweite Fallsonde Nr. 903866 hat eine mittlere Abweichung von 5.7 % relative Feuchte von der Referenz, die DFM06 Radiosonde hat eine mittlere Abweichung von 4.5 % relative Feuchte. Die Standardabweichungen der relativen Feuchte ist bei allen Sonden und der Referenz kleiner als 0.2 % relative Feuchte und zeugen damit von einem stabilen Feuchtwert über den Messzeitraum. Die Messergebnisse der Sonden liegen im Vergleich von der Referenz außerhalb der Sensorgenauigkeit, die Fallsonde Nr. 903866 liegt mit einer Abweichung von 5.7 % relative Feuchte auch außerhalb der WMO-Vorgabe. Ansonsten gilt hier das gleiche Sensorverhalten wie bei den Dauertests. Die Abweichung der Messwerte von der mittleren Abweichung der Sonden zeigt den Sensorfehler an, der innerhalb der Sensorgenauigkeit liegt. Die Feuchtemessung ist aufgrund der großen Abweichung von der Referenz bei stabilen Bedingungen als nicht gut anzusehen. Dies ließe sich durch eine bessere werksseitige Kalibrierung verbessern. Die Kalibrierfunktion, ein Polynom 3. Grades, des Feuchtesensors ist allerdings nicht bekannt, sodass eine nachträgliche Korrektur der Messwerte nicht durchgeführt werden konnte.

Die Abweichungen der Temperaturmessung bei einer konstanten Temperatur von rund 20 °C liegen bei allen Sonden innerhalb der Sensorgenauigkeit von 0.2 K und mit nur einer Ausnahme immer unter

0.1 K (Tab. 3.4). Die Standardabweichungen sind gering und kleiner als die Sensorauflösung von 0.01 K. Die Temperaturmessung ist daher als sehr gut einzustufen. Die beiden Fallsonden messen eine leicht höhere Temperatur als die DFM06 Radiosonde, die Abweichungen sind für meteorologische Messungen vernachlässigbar.

Tab. 3.4: Stundenmittelwerte der Temperatur in °C, Klimet A30-I, Fallsonden und Radiosonde, jeweils mit Standardabweichung.

Feuchtstufe	Klimet A30-I	Fallsonde Nr. 903866	Fallsonde Nr. 903927	Radiosonde DFM06
1	19.76 ±0.02	19.85 ±0.01	19.80 ±0.01	19.97 ±0.01
2	19.77 ±0.01	19.84 ±0.01	19.80 ±0.01	19.76 ±0.01
3	19.76 ±0.01	19.83 ±0.01	19.79 ±0.01	19.75 ±0.01
4	19.73 ±0.01	19.82 ±0.01	19.78 ±0.01	19.74 ±0.01
5	19.71 ±0.01	19.82 ±0.01	19.78 ±0.01	19.74 ±0.01

Tab. 3.5: Stundenmittelwerte der relativen Feuchte in % von Klimet A30-I, Fallsonden und Radiosonde, jeweils mit Standardabweichung.

Feuchtstufe	Klimet A30-I	Fallsonde Nr. 903866	Fallsonde Nr. 903927	Radiosonde DFM06
1	12.63 ±0.18	17.87 ±0.06	15.50 ±0.06	17.91 ±0.06
2	24.56 ±0.10	30.70 ±0.09	28.06 ±0.07	30.35 ±0.08
3	44.28 ±0.07	51.15 ±0.09	48.28 ±0.09	49.71 ±0.08
4	63.12 ±0.06	69.45 ±0.14	66.80 ±0.15	67.21 ±0.12
5	81.45 ±0.05	85.55 ±0.20	83.37 ±0.19	83.26 ±0.18

In einem zweiten Versuch wurde die erste Feuchtesequenz eine Woche später wiederholt, um eine Reproduzierbarkeit der Feuchtemessung zu überprüfen (Abb. 3.8). Die Feuchtemessungen der Fallsonden und der DFM06 Radiosonde weichen im Vergleich zur ersten Feuchtesequenz bei allen Feuchtstufen um weniger als 1 % relative Feuchte ab und konnten gut innerhalb der Sensorgenauigkeit reproduziert werden (Tab. 3.6). Die DFM06 Radiosonde misst bei diesem zweiten Versuch die gleichen Feuchtwerte wie die Fallsonde Nr. 903927 (Tab. 3.6) und zeigt zudem eine geringere Abweichung von der Referenz als beim ersten Versuch. Die Abweichungen in den ersten beiden Feuchtstufen liegen mit 3 % relative Feuchte für die Fallsonde Nr. 903927 und die DFM06 Radiosonde und 5 % relative Feuchte für die Fallsonde Nr. 903866 noch innerhalb der WMO-Vorgaben und entsprechen den Ergebnissen der ersten Feuchtesequenz. Auch hier gilt, dass nach Abzug der mittleren Abweichung alle Sonden innerhalb der Sensorgenauigkeit messen. Ab der dritten Feuchtstufe zeigt die Feuchtemessung des Taupunktspiegelhygrometers bei gleichen Einstellungen der Feuchte wie beim ersten Versuch deutlich niedrigere Werte (Abb. 3.8). Die Referenzmessung weicht somit bis zu 11 % relative Feuchte von der ersten Feuchtese-

quenz ab (vgl. Tab 3.5 und 3.6). Eine Erklärung für dieses Verhalten fällt schwer, da die Messungen gleich durchgeführt und die gleichen Einstellungen verwendet wurden. Aufgrund der langen Stabilisierungsphasen und Messzeiten scheint ein unzureichender Luftaustausch an der Spiegeloberfläche als unrealistisch, da das Taupunktspiegelhygrometer über einen Ventilator die zu vermessende Luft selbst ansaugt und auch nicht außerhalb der Gerätespezifikationen betrieben wurde. In den Klimakammerdaten wird auch der Status des Klimet-A30-I übertragen, der keinen Fehler des Taupunktspiegels aufgrund eines Defekts oder Fehlfunktion anzeigt.

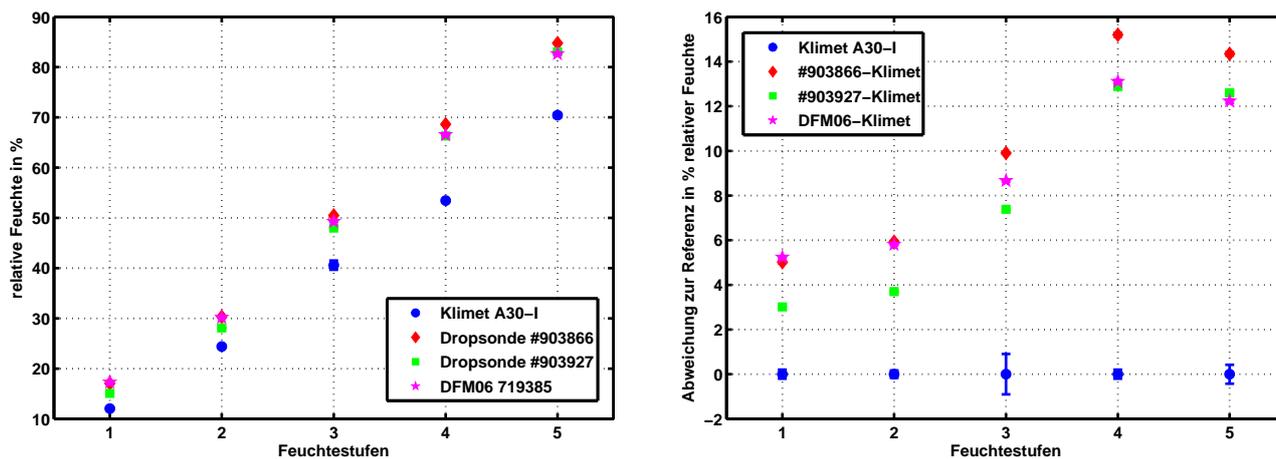


Abb. 3.8: Links: Zweite fünfstufige Feuchtesequenz. Rechts: Abweichung der Mittelwerte von der Referenz.

Der Temperaturverlauf ist ähnlich gut wie bei der ersten Feuchtesequenz (Tab. 3.7). Die Abweichungen von der Referenz liegen innerhalb der Sensorgenauigkeit und sind bis auf eine Ausnahme kleiner als 0.1 K. Die Standardabweichungen sind sehr klein und bestätigen ein konstante Temperatur in der Klimakammer. Die Temperatur änderte sich während der Messungen in der Klimakammer nur um etwa 0.02 K.

Die Ergebnisse zeigen, dass Feuchtemessungen gut reproduziert werden können. Die Messwerte der zweiten Feuchtesequenz stimmen sehr gut mit der ersten Feuchtesequenz überein. Die Genauigkeit beim zweiten Versuch der Feuchtemessung kann aufgrund der anders messenden Referenz jedoch nicht vollständig bestätigt werden.

Tab. 3.6: Stundenmittelwerte der relativen Feuchte in % von Klimet A30-I, Fallsonden und Radiosonde, jeweils mit Standardabweichung.

Feuchtestufe	Klimet A30-I	Fallsonde Nr. 903866	Fallsonde Nr. 903927	Radiosonde DFM06
1	12.06 ±0.20	17.08 ±0.05	15.07 ±0.06	15.06 ±0.05
2	24.39 ±0.17	30.32 ±0.04	28.09 ±0.07	28.09 ±0.03
3	40.59 ±0.90	50.49 ±0.03	47.97 ±0.09	47.97 ±0.05
4	53.44 ±0.21	68.64 ±0.09	66.32 ±0.15	66.32 ±0.08
5	70.44 ±0.42	84.78 ±0.08	83.04 ±0.19	83.04 ±0.07

Tab. 3.7: Stundenmittelwerte der Temperatur in °C von Klimet A30-I, Fallsonden und Radiosonde, jeweils mit Standardabweichung.

Feuchtestufe	Klimet A30-I	Fallsonde Nr. 903866	Fallsonde Nr. 903927	Radiosonde DFM06
1	19.74 ±0.04	19.85 ±0.01	19.81 ±0.01	19.77 ±0.01
2	19.76 ±0.04	19.85 ±0.01	19.81 ±0.01	19.78 ±0.01
3	19.76 ±0.04	19.84 ±0.01	19.80 ±0.01	19.77 ±0.01
4	19.75 ±0.03	19.83 ±0.01	19.80 ±0.01	19.76 ±0.01
5	19.74 ±0.03	19.83 ±0.01	19.80 ±0.01	19.76 ±0.01

### 3.1.4 Vergleich von zwei Produktionsserien von Fallsonden

Nach den ersten Messreihen in der Klimakammer und ersten Testabwürfen aus dem Flugzeug mit acht Fallsonden der Vorserie wurden in Rücksprache mit dem Hersteller GRAW noch kleine Designänderungen an der Platine durchgeführt. Nach der Lieferung der ersten Sonden der Produktionsserie wurde daher noch einmal eine Vergleichsmessung in der Klimakammer mit der Fallsonde Nr. 903927 der Vorserie durchgeführt. Die Fallsonde Nr. 903927 der Vorserie wurde bei den meisten Messreihen in der Klimakammer und bei einem Abwurf aus dem Flugzeug Dornier Do-128 eingesetzt. Nach dem Abwurf wurde die Sonde durch den Hersteller GRAW geprüft und instandgesetzt. Der Vergleich zwischen Vor- und Produktionsserie sollte mögliche Unterschiede zwischen zwei Produktionsserien aufdecken. Als Testsequenz wurde eine Temperatursequenz zwischen 0 °C und 40 °C mit variabler Feuchte durchgeführt (Tab. 3.8 und 3.9). Die Feuchtestufen wurden ähnlich wie bei den früheren Dauertests (feucht kalt, trocken warm) gewählt. Leider funktionierte die Feuchterege lung auf die eingestellten Werte nicht und die Feuchte blieb bei hohen Feuchtwerten zwischen 84 % und 93 % relative Feuchte während der gesamten Messung.

Der Vergleich der Fallsonden der Vor- und Produktionsserie zeigt keine signifikanten Unterschiede (Tab. 3.10). Die größte mittlere Abweichung von der Referenz hat die Fallsonde Nr. 910791 mit 0.07 K. Die Fallsonden Nr. 903927 und Nr. 910822 messen in etwa die gleichen Temperaturen und für beide wurde die selbe mittlere Abweichung von der Referenz mit 0.06 K berechnet. Die Fallsonde Nr. 910817 hat die kleinste mittlere Abweichung von der Referenz mit nur 0.02 K. Somit messen alle Sonden innerhalb der Sensorgenauigkeit und in sehr guter Übereinstimmung untereinander und zur Klimakammerreferenz.

Die Feuchtemessungen aller Sonden liegen in etwa auf dem gleichen Niveau. Die Abweichungen zwischen den Sonden beträgt maximal 1.3 % relative Feuchte und liegt damit innerhalb der Sensorgenauigkeit. Die Abweichungen von der Referenz sind zwischen den Serien ähnlich und liegen zwischen 2.8 % und 4 % relative Feuchte. Zwei Fallsonden der Produktionsserie messen mit einer Abweichung kleiner als 3 % relative Feuchte von der Referenz.

In dieser Vergleichsmessung können keine signifikanten Unterschiede in der Temperatur- oder Feuchtemessung zwischen der Vor- und Produktionsserie festgestellt werden (Tab. 3.10). Die Temperaturmessung zeigt geringe Abweichungen unter den Fallsonden, die aber vernachlässigbar sind. Die Feuchtemessung zeigt geringe Unterschiede zwischen den Fallsonden. Die Abweichungen von der Referenz entsprechen den Ergebnissen der bisherigen Testmessungen. Die Messgenauigkeit könnte durch eine verbesserte Kalibrierung des Feuchtesensors erheblich verbessert werden.

Eine realitätsnahe Simulation eines Aufstiegs innerhalb des Betriebsbereiches der Klimakammer misslang, da die Feuchterege lung nicht funktionierte und so das festgelegte Feuchtekriterium nicht erreicht wurde. Eine Wiederholung war im Rahmen dieser Arbeit leider nicht mehr möglich, da im Anschluss die Vergleichsmessungen beim DWD in Lindenberg anstanden.

Tab. 3.8: Stundenmittelwerte der Temperatur in °C von Klimet A30-I und vier Fallsonden, jeweils mit Standardabweichung.

Temperaturstufen	Klimet A30-I	Nr. 903927	Nr. 910791	Nr. 910817	Nr. 910822
1	-0.26 ±0.07	-0.18 ±0.01	-0.18 ±0.01	-0.21 ±0.01	-0.19 ±0.01
2	4.76 ±0.05	4.83 ±0.01	4.82 ±0.01	4.78 ±0.01	4.81 ±0.01
3	9.68 ±0.08	9.76 ±0.02	9.76 ±0.02	9.71 ±0.02	9.75 ±0.02
4	14.53 ±0.08	14.71 ±0.02	14.71 ±0.02	14.66 ±0.02	14.70 ±0.02
5	19.53 ±0.07	19.69 ±0.02	19.70 ±0.01	19.64 ±0.01	19.69 ±0.01
6	24.64 ±0.06	24.67 ±0.01	24.69 ±0.02	24.62 ±0.02	24.67 ±0.02
7	29.62 ±0.06	29.66 ±0.01	29.68 ±0.01	29.62 ±0.01	29.67 ±0.01
8	34.61 ±0.06	34.55 ±0.01	34.68 ±0.01	34.62 ±0.01	34.66 ±0.01
9	39.59 ±0.05	39.66 ±0.01	39.69 ±0.01	39.63 ±0.01	39.67 ±0.01

Tab. 3.9: Stundenmittelwerte der relativen Feuchte in % von Klimet A30-I und vier Fallsonden, jeweils mit Standardabweichung.

Temperaturstufen	Klimet A30-I	Nr. 903927	Nr. 910791	Nr. 910817	Nr. 910822
1	84.52 ±0.08	89.79 ±0.04	88.22 ±0.05	89.99 ±0.04	88.42 ±0.05
2	88.03 ±0.07	92.73 ±0.05	90.94 ±0.05	92.55 ±0.05	91.14 ±0.05
3	89.03 ±0.07	93.06 ±0.17	91.92 ±0.18	93.41 ±0.16	92.05 ±0.20
4	89.90 ±0.11	93.72 ±0.12	92.71 ±0.13	94.06 ±0.13	92.77 ±0.14
5	90.67 ±0.12	94.20 ±0.11	93.55 ±0.44	94.53 ±0.13	93.32 ±0.14
6	90.05 ±0.13	23.88 ±0.82	92.81 ±0.87	94.24 ±0.80	92.96 ±0.89
7	91.87 ±0.18	94.93 ±1.43	94.36 ±1.63	95.30 ±1.38	94.13 ±1.50
8	92.06 ±0.25	94.84 ±2.03	94.32 ±2.27	95.13 ±2.02	93.93 ±2.23
9	92.71 ±0.24	95.78 ±0.30	95.46 ±0.38	95.98 ±0.32	94.95 ±0.36

Tab. 3.10: Mittlere Abweichung über die Messreihe der vier Fallsonden von der Referenz (Klimet A30-I).

	Nr. 903927	Nr. 910791	Nr. 910817	Nr. 910822
Temperatur in °C	0.06	0.07	0.02	0.06
relative Feuchte in %	3.73	2.83	4.04	2.76

### 3.2 Vergleichsmessung mit der Karlsruher Fallsonde

In der ersten Novemberwoche wurden zwei Tandemaufstiege mit der Karlsruher Fallsonde, im Folgenden Drop-Up-Sonde genannt, durchgeführt. Die Vorbereitungen umfassten eine Anmeldung der Aufstiege bei der Deutschen Flugsicherung (DFS). In Telefon- und Emailkontakt mit Andreas Miltner von der „Deutsche Flugsicherung GmbH“ wurden die Details der Aufstiege und die Konfiguration des Tandems ausgetauscht. Unter der Auflage der Ankündigung der Aufstiege einen Tag im voraus wurden die Starts von der DFS genehmigt. Das Empfangsequipment wurde im Bau 103 in der Nähe der Messwiese auf dem Gelände des KIT Campus Nord für den Empfang von drei GRAW-Sonden (drei GRAW-Empfänger mit 400 MHz-Antenne, GPS-Antenne und der GRAWMet Software Version 04.06.02 mit der neuen Filterfunktionen für die Temperatur- und Feuchtemessung) aufgebaut. Als Startzeit wurde 12 UTC ausgewählt, um die Aufstiegsprofile mit umliegenden Radiosondenstationen Stuttgart-Schnarrenberg und Idar-Oberstein des DWD vergleichen zu können. Die Vorbereitung der Drop-Up-Sonden wurden von Holger Mahlke durchgeführt. Die maximale Messhöhe war in der Konfiguration der Drop-Up-Sonde auf 12 km Höhe festgelegt, um eine spätere Einsatzhöhe der KITsonde im Flugzeug HALO zu simulieren. Die Drop-Up-Sonde trennte in der eingestellten Höhe die Verbindung zum Ballon und das Gespann fiel am Fallschirm wieder zu Boden.

Unterhalb der Drop-Up-Sonde in etwa 10 m Abstand waren zwei Fallsonden links und rechts an einer Stange und in der Mitte eine DFM06 Radiosonde befestigt (Abb. 3.9). Die Fallsonden hatten zum Schutz der Sondenelektronik eine Styroporisolierung (wie Abb. 2.2). Die Ausrichtung der Sensoren war an einem freien Fall der Sonden orientiert, d.h. mit den Sensoren nach unten. Die Initialisierung der Sonden



Abb. 3.9: Anbringung der GRAW-Sonden an einer Stange etwa 10 m unterhalb der Karlsruher Drop-Up-Sonde.

erfolgte an den GRAW-Empfängern. Die Bodenwerte wurden aus den Messungen des 200 m-Masts am KIT Campus Nord übernommen.

Das Auswerteschema orientiert sich an den Praktiken der Radiosondenvergleichstests der WMO (da Silveira et al. (2006) und Nash et al. (2006)) und der Vergleichsmesskampagne LUAMI in Lindenberg 2008 (Immler, 2009). Bei der Auswertung wurden die fehlerhaften Daten mit Hilfe von Übersichtsdarstellungen manuell durch NaN-Werte ersetzt und bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Als Datensatz liegt ein Aufstieg bis 12 km Höhe und der Fall am Fallschirm von 12 km Höhe bis zum Boden vor. Beide Flugphasen wurden getrennt untersucht. Der Datenempfang wurde erst mit der bestätigten Landung des Tandem (SMS der Drop-Up-Sonde) an den GRAW-Empfängern beendet. Mit der GRAWMet-Software wurden aus den Messdaten der Fallsonden und DFM06 Radiosonde tabellarische Profildaten mit einer Zeitauflösung von einer Sekunde erstellt, sodass die Daten mit der gleichen zeitlichen Auflösung wie die der Drop-Up-Sonde vorliegen. Die Profildaten der Sonden wurden aneinander angepasst, sodass alle Aufstiegsdaten zeit synchron vorliegen. Diese Anpassung wurde auch nach der Abtrennung vom Ballon durchgeführt.

Bei beiden Tandemaufstiegen am 03.11.2009 und 05.11.2009 brach die Verbindung zu den Fallsonden während des Sinkfluges zwischen 2 km und 7 km Höhe ab. Somit konnte kein vollständiges Fallprofil von den Fallsonden und der DFM06 Radiosonde aufgezeichnet werden. Der Empfangsabbruch bei den GRAW-Sonden war auf die Dämpfung des Signals auf dem Weg durch die Atmosphäre, eine Unterbrechung der Sichtverbindung und Abschattung des Signals durch die Orographie bei niedrigen Höhenwinkeln zurückzuführen. Die Position der Antennen zwischen den Gebäuden war nicht günstig, aber für diesen Versuch leider nicht besser zu lösen.

Generell ist auffallend, dass die GPS-Daten aufgrund ihrer Länge anfälliger für Übertragungsfehler sind als Temperatur- und Feuchtwerte. Ein erstes Anzeichen für schlechter werdenden Empfang ist daher der Verlust von GPS-Informationen. In der späteren Auflistung der Fehlerraten der Fallsonden wurden Ausfallwerte und falsch decodierte Werte zusammengefasst. Große Datenlücken sind fast ausschließlich auf Ausfallwerte wegen eines schlechten Signals zurückzuführen. Falsch decodierte Werte kommen hingegen selten vor.

### **3.2.1 Erster Tandemaufstieg, Dienstag, 03.11.2009**

Der Start des Tandem erfolgte kurz nach 12 UTC, bei dem folgende Sonden zum Einsatz kamen:

- Karlsruher Drop-Up-Sonde Nr. 33
- Fallsonde Nr. 910806
- Fallsonde Nr. 910808
- DFM06 Radiosonde Nr. 719405

Das Tandem wurde mit den Bodenwerten des 200 m-Masts bei einer Temperatur von 11.6 °C und etwa 61 % relative Feuchte bei windstillen Bedingungen und 6/8 Bewölkung gestartet. Durch die Beobachtung der Sondierung an den Empfängern konnte kurz nach dem Start ein Empfangsabbruch der Fallsonde

Nr. 910806 festgestellt werden. Der Empfangsabbruch und die daraus resultierende Datenlücke wurde durch ein defektes Antennenkabel (Wackelkontakt am Stecker) verursacht. Die Störung konnte jedoch während des Aufstiegs behoben werden. Der Zeitraum der Störung wurde für die Auswertung nicht berücksichtigt. Die Aufstiegsdauer auf 12 km Höhe betrug knapp 39 Minuten, der Fall 21.5 Minuten. Die Zeitdifferenz kommt durch die unterschiedlichen Aufstiegs- und Fallgeschwindigkeiten zustande, siehe Abb. 3.10. Während die Steiggeschwindigkeit des Tandem durch die Ballonbefüllung beeinflusst werden kann und für den Aufstieg konstant bei typischen  $5 \text{ ms}^{-1}$  liegt, spielt die geringere Luftdichte in der Höhe beim Fall eine Rolle. Der Fallschirm wird durch die geringere Luftdichte in großen Höhen und dem damit kleineren Luftwiderstand nicht so stark abgebremst wie in Bodennähe. Die Fallgeschwindigkeit nimmt mit abnehmender Höhe ab.

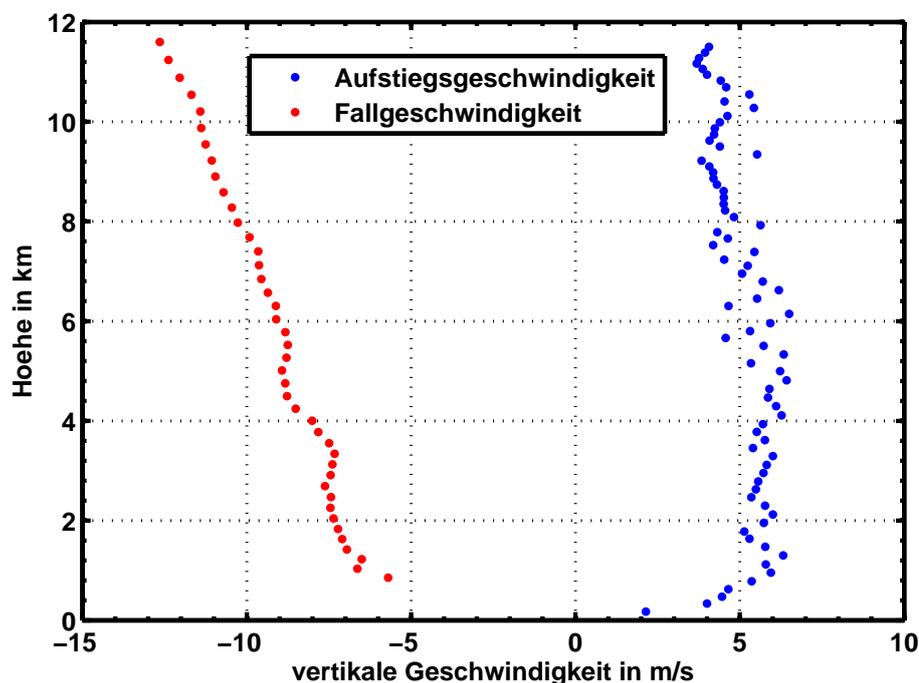


Abb. 3.10: Differenz der Vertikalgeschwindigkeiten beim Aufstieg und Fall, Tandemaufstieg am 03.11.2009

Die Sondendaten wurden zeitlich über 30 Sekunden gemittelt und miteinander verglichen. Neben den Standardabweichungen wurden auch die Differenzen zu den Mittelwerten berechnet und nach Vorbild der Radiosondenvergleichstests bei der LUAMI Kampagne (Immler, 2009) zusammen aufgetragen (Abb. 3.13 und 3.14). Zusätzlich ist die Standardabweichung der Drop-Up-Sonde als gestrichelte Linie eingezeichnet.

Man muss der Mittelwertberechnung der Windrichtung Beachtung schenken, da die Windrichtung eine Diskontinuität in der Windrichtungsskala bei  $0^\circ$  und  $360^\circ$  aufweist. Die Mittelwerte der Windrichtung werden nach einer von Y. Mitsuta (1985) vorgeschlagenen Methode berechnet (Mori, 1986). Der  $(i+1)$ -te Wert der Windrichtung wird als

$$D_{i+1} = D_i + \delta_i \quad [3.1]$$

definiert, mit  $\delta_i$  als Variation der Richtung in einem Zeitintervall zwischen den Datenpunkten  $i$  und  $(i+1)$ . Mit bekannten Startwerten  $\hat{D}_i$  und  $\hat{D}_{i+1}$  und der Voraussetzung

$$|\delta_i| < 180^\circ, \quad [3.2]$$

kann  $\delta_i$  folgendermaßen definiert werden:

$$\text{Ist } |\hat{D}_{i+1} - \hat{D}_i| < 180^\circ, \text{ dann gilt: } \delta_i = \hat{D}_{i+1} - \hat{D}_i, \quad [3.3]$$

$$\text{ist } \hat{D}_{i+1} - \hat{D}_i < -180^\circ, \text{ dann gilt: } \delta_i = \hat{D}_{i+1} - \hat{D}_i + 360^\circ, \quad [3.4]$$

$$\text{ist } \hat{D}_{i+1} - \hat{D}_i > 180^\circ, \text{ dann gilt: } \delta_i = \hat{D}_{i+1} - \hat{D}_i - 360^\circ. \quad [3.5]$$

Mit dieser Berechnungsmethode lässt sich der Mittelwert der Windrichtung mit der bekannten Gleichung für das arithmetische Mittel

$$\bar{D} = n^{-1} \sum_{i=1}^n D_i \quad [3.6]$$

und die Standardabweichung der Windrichtung  $\sigma_d$  mit

$$\sigma_d = \sqrt{(n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n D_i^2 - \bar{D}^2} \quad [3.7]$$

berechnen.

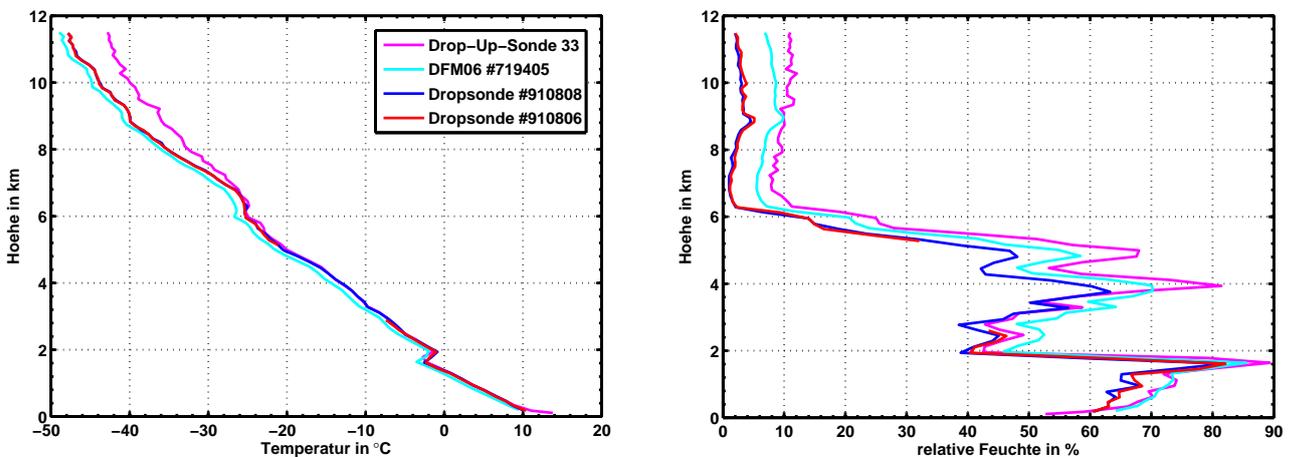


Abb. 3.11: Links: Temperaturprofil des ersten Tandemaufstiegs am 03.11.2009, 12 UTC. Rechts: Profil der relativen Feuchte.

Das Temperaturprofil wird von allen Sonden ähnlich wiedergegeben. Temperaturstrukturen und die Messung der Inversion werden in Ihrem Verlauf von allen Sonden gleich wiedergegeben. Beide Fallsonden messen über den gesamten Aufstieg fast identische Messwerte (Abb. 3.11). Bis etwa 6 km Höhe liegen die Temperaturmessungen der Fallsonden und Drop-Up-Sonde nahe beieinander, die Abweichungen zur Drop-Up-Sonde sind im Mittel 0.01 K. Die DFM06 Radiosonde misst den gleichen Temperaturverlauf, aber mit niedrigeren Temperaturwerten. Die Abweichungen der DFM06 Radiosonde sind im Vergleich zur Drop-Up-Sonde und beiden Fallsonden in dieser Messung immer größer als 1.0 K (Abb.

3.13, links). Ab etwa 6 km Höhe nimmt die Abweichung der Temperaturmessung der GRAW-Sonden von der Drop-Up-Sonde mit zunehmender Höhe zu und erreicht ca. 5 K bis 6 K in 12 km Höhe. Der Grund dafür ist die Abwärme des Peltierelements des Taupunktspiegelhygrometers, die den Temperatursensor beim Aufstieg stromauf beeinflusst (Abb. 2.3, rechts). Da der Strömungskanal der Drop-Up-Sonde für den Fall optimiert ist, wird der Strömungskanal bei einem Aufstieg nicht optimal von der Luft durchströmt (persönliche Mitteilung Holger Mahlke). Bei diesem Aufstieg stimmt die Temperaturzunahme mit der Feuchteabnahme ab 6 km Höhe überein (Abb. 3.11). Mit einer Abnahme der Feuchte muss das Taupunktspiegelhygrometer den Spiegel auf eine tiefere Temperatur kühlen, dabei erhitzt sich die warme Seite des Peltierelements stärker.

Die DFM06 Radiosonde misst im Vergleich zu beiden Fallsonden eine um etwa 1 K niedrigere Temperatur während des Aufstiegs. Eine solche große Differenz zeigte sich während der Labormessungen nicht. Eine Fehlerquelle könnte die sich erwärmende Sonderelektronik und die Styroporisolierung der Fallsonden sein, die während des Aufstiegs Wärme direkt an die stromab liegenden Temperatursensoren der Fallsonde abgeben können.

Das Feuchteprofil wird von allen eingesetzten Sonden ähnlich wiedergegeben, Unterschiede ergeben sich nur im Messwert. Die Abweichungen zwischen den Fallsonden und der Drop-Up-Sonde betragen bis 4 km Höhe zwischen 5 % und 7 % relative Feuchte, dabei messen die Fallsonden einen niedrigeren Feuchtwert. Die DFM06 Radiosonde misst bis zur Inversion knapp unter 2 km Höhe fast die gleichen Feuchtwerte wie die Drop-Up-Sonde. Den Bereich der Inversion messen alle Sonden ähnlich, die Abweichungen im Messwert nehmen stark zu, auf bis zu 20 % relative Feuchte (Abb. 3.13, rechts). In diesem Bereich zeigt die Drop-Up-Sonde Feuchtwerte größer als 90 % relative Feuchte. Der Helligkeitsmesser der Drop-Up-Sonde zeigt einen Wolkendurchflug an (nicht gezeigt). Die Feuchteabnahme oberhalb der Inversion auf Werte zwischen 40 % und 50 % relative Feuchte zeigen die GRAW-Sonden in einer etwas niedrigeren Höhe als die Drop-Up-Sonde. Es kann sein, dass in diesem Bereich die Temperatursteuerung des Taupunktspiegels der Drop-Up-Sonde dem Feuchteverlauf etwas hinterherhinkt. Oberhalb der Inversion bis 4 km Höhe liegen die Abweichungen wieder zwischen 5 % und 10 % relative Feuchte. Ab 4 km Höhe misst die Drop-Up-Sonde bis etwa 20 % relative Feuchte höhere Feuchtwerte als die GRAW-Sonden, bei einem gleichen Verlauf des Feuchteprofils. Ein klares Anzeichen für einen Wolkendurchflug in dieser Höhe lässt sich aus den Profildaten nicht ableiten. Zwischen 6 km und 12 km Höhe sind die Abweichungen wieder kleiner als 10 % relative Feuchte.

Der Radiosondenvergleichstest der WMO im Jahr 2005 auf Mauritius verweist auf Probleme des in der Drop-Up-Sonde verwendeten „Snow White“-Taupunktspiegelhygrometers bei Messungen in größeren Höhen und bei tiefen Temperaturen und empfiehlt das Taupunktspiegelhygrometer nicht als alleinige Referenz zu verwenden. In Verbindung mit Messungen von hochqualitativen Feuchtesensoren bleibt das Taupunktspiegelhygrometer als Vergleichsmessgerät, aufgrund des unterschiedlichen Messprinzips der Feuchte, dennoch wichtig (Nash et al., 2006).

Die Abweichungen zwischen den Fallsonden und der DFM06 Radiosonde ist im Mittel bei 6 % relative Feuchte, wobei die Fallsonden einen niedrigeren Feuchtwert messen.

Im Vergleich dazu wurden die Temperatur- und Feuchteprofile von zwei Radiosondenaufstiegen des DWD um 12 UTC der Stationen Idar-Oberstein (Entfernung etwa 104 km nordwestlich des KIT-Campus Nord) und Stuttgart-Schnarrenberg (Entfernung etwa 63 km westlich des KIT-Campus Nord) untersucht (Abb. 3.12). Die Temperaturprofile der DWD-Messungen zeigen kleine Unterschiede im Temperaturpro-

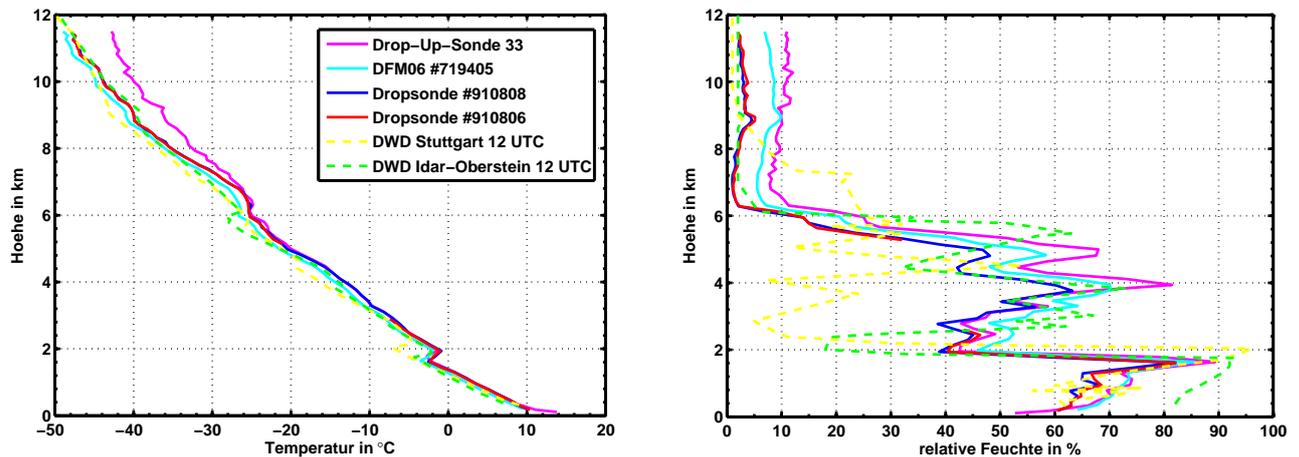


Abb. 3.12: Links: Temperaturprofil des ersten Tandemaufstiegs am 03.11.2009, 12 UTC, mit Radiosondenaufstiegen des DWD in Idar-Oberstein und Stuttgart-Schnarrenberg (gestrichelt). Rechts: Profil der relativen Feuchte.

fil, die auf den unterschiedlichen Messort zurückzuführen sind. Ab 6 km Höhe zeigen die Temperaturmessungen der DWD-Aufstiege, vor allem die Radiosonde der Station Idar-Oberstein, eine gute Übereinstimmung mit den Messungen der Fallsonden und der DFM06 Radiosonde. Damit ist gezeigt, dass die Temperaturmessung der Drop-Up-Sonde stark durch die Abwärme des Taupunktspiegelhygrometers beeinflusst ist und daher als fehlerhafte Messung betrachtet werden muss.

Das Feuchteprofil der Radiosonde aus Idar-Oberstein zeigt viele Ähnlichkeiten mit dem Profil der Fallsonden (Abb. 3.12). Dies gilt vor allem oberhalb von 6 km Höhe. Der Stuttgarter Aufstieg zeigt dagegen ein anderes Feuchteprofil mit einem Bereich niedriger Feuchtwerte zwischen 2 km und 5 km Höhe. Die deutliche Abnahme der Feuchte wurde im Stuttgarter Aufstieg erst in über 7 km Höhe gemessen. Die Unterschiede und Ähnlichkeiten der DWD-Messungen und den Aufstiegen vom KIT Campus Nord lassen sich durch die unterschiedlichen Startorte und den vorherrschenden Windverhältnissen erklären, die während des Aufstiegs immer eine westliche Komponente aufwiesen. In Bodennähe wurden südwestliche Winde gemessen, bis zur Inversion dreht der Wind weiter auf West und bis Nordwest in größeren Höhen. Die Windgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe von  $3 \text{ ms}^{-1}$  in Bodennähe bis auf  $40 \text{ ms}^{-1}$  in 11 km zu (nicht gezeigt).

Die Berechnungen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung aus den GPS-Daten zeigen insgesamt eine gute Übereinstimmung (Abb. 3.14). Die Abweichungen der Windrichtung der Fallsonden von der Drop-Up-Sonde sind im Mittel kleiner als  $1^\circ$ . Die Werte der GRAW Sonden liegen meist innerhalb der

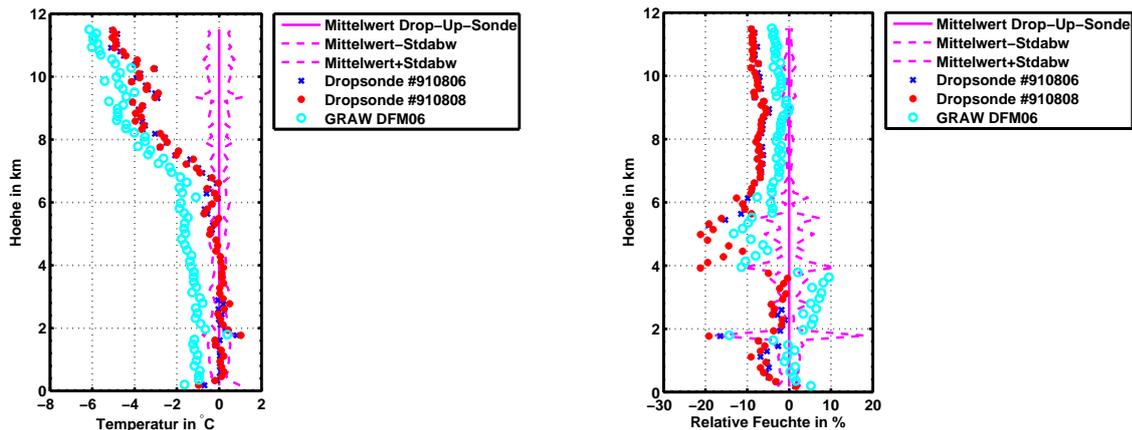


Abb. 3.13: Abweichung der Mittelwerte von der Drop-Up-Sonde der Temperatur (links) und der relativen Feuchte (rechts).

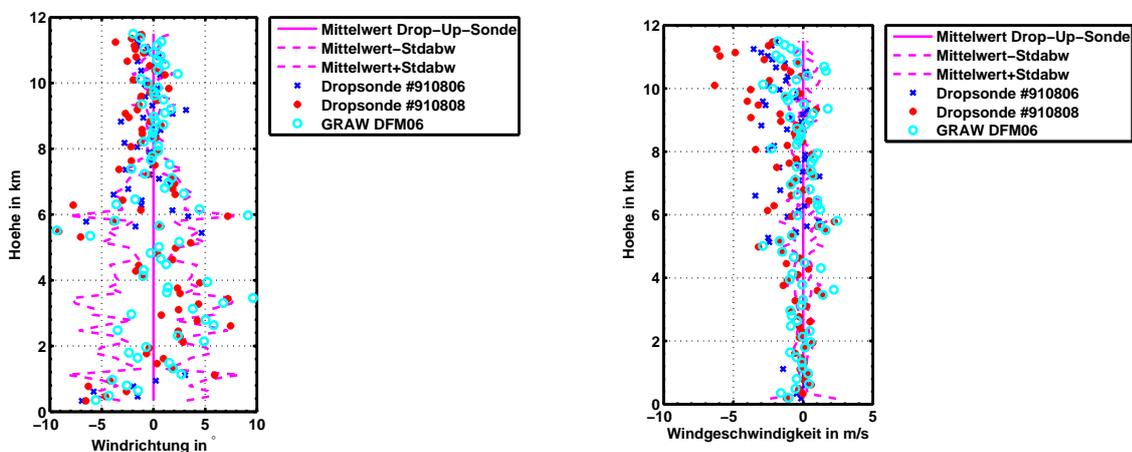


Abb. 3.14: Abweichung der Mittelwerte von der Drop-Up-Sonde der Windrichtung (links) und Windgeschwindigkeit (rechts).

Standardabweichung der Drop-Up-Sonde. Vom Boden bis etwa 8 km Höhe ist die Streuung der Werte um die Mittelwerte der Drop-Up-Sonde etwas größer (maximale Abweichung:  $\pm 10^\circ$ ) als oberhalb von 8 km (maximale Abweichung:  $\pm 3.5^\circ$ ). Die Windgeschwindigkeit wird von allen GRAW-Sonden im Mittel geringer als die der Drop-Up-Sonde berechnet, wobei die Fallsonden im Mittel eine um  $1.06 \text{ ms}^{-1}$  bzw.  $1.13 \text{ ms}^{-1}$  geringere Geschwindigkeit messen. Die Abweichungen nehmen mit der Höhe zu. Bis in die Höhe von 8 km weicht die Windgeschwindigkeit maximal  $4 \text{ ms}^{-1}$  von der Drop-Up-Sonde ab. Die Fallsonde Nr. 910808 erreicht die größten Abweichungen im Höhenbereich von 10 km bis 12 km Höhe mit bis zu  $6 \text{ ms}^{-1}$ . Die Fallsonde Nr. 910806 hat die größten Abweichungen mit etwa  $3.5 \text{ ms}^{-1}$  geringeren Windgeschwindigkeiten ebenfalls zwischen 10 km und 12 km Höhe. Die größeren Abweichungen der Fallsonde Nr. 910808 lassen sich nicht durch Unregelmäßigkeiten oder Ausreißer in den GPS-Daten belegen. Die Winddaten der Fallsonden sollten eine höhere Genauigkeit haben als die berechneten Daten der Drop-Up-Sonde, da die Drop-Up-Sonde einen GPS-Empfänger einer älteren Generation einsetzt.

Dies könnte die Zunahme der Abweichungen bei den höheren Windgeschwindigkeiten zwischen 10 km und 12 km Höhe erklären.

Die Empfangsbedingungen während des Aufstiegs waren gut. Bis auf den Datenausfall durch das defekte Antennenkabel bei der Fallsonde Nr. 910806 und dem daraus resultierenden Empfangsabbruch sind die Profildaten mit einer Zeitaufösung von einer Sekunde fast vollständig vorhanden (siehe Tab. 3.11). Die Fehlerraten der Messgrößen Temperatur, relative Feuchte und Positionsdaten übertragen sich

Tab. 3.11: Übersicht der Übertragungsfehler in Prozent aus den Profildaten des ersten Tandemaufstiegs am 03.11.2009.

Variable	Nr. 910806	Nr. 910808	DFM06
Temperatur	21.47	0.0	0.0
Relative Feuchte	21.47	0.35	0.0
Windrichtung	30.22	0.0	0.0
Windgeschwindigkeit	30.22	0.0	0.0
Position Länge	28.74	0.0	0.0
Position Breite	28.74	0.0	0.0
Position Höhe	15.67	0.0	0.0

auf die berechneten Größen (Windrichtung und -geschwindigkeit, Taupunkt). Die Winddaten haben direkt nach Wiederaufnahme des GPS-Empfangs noch fehlerhafte Werte, die ebenfalls herausgenommen wurden. Für einen optimalen Empfang muss eine Sichtlinienverbindung zwischen der Sonde und der Empfangsantenne bestehen. Die niedrigen Ausfallwerte der Fallsonde Nr. 910808 und DFM06 Radiosonde zeigen die gute Datenqualität, bei der die Decodierung des Sondersignals problemlos funktioniert. Da die Drop-Up-Sonde ihre Daten lokal in der Sonde speichert ergeben sich bei ihr keine Ausfallwerte in den Daten. Die Fehlerraten der Fallsonden Nr. 910806 sind hauptsächlich durch den Empfangsabbruch nach dem Start bis zur Behebung der Störung zu erklären. Unterschiede in der Decodierung sind nicht festzustellen.

Die Abtrennung des Ballons erfolgte in einer Höhe von 12 km und ein Fallprofil wurde aus dieser Höhe bis zum Boden gemessen. Während des Falls am Fallschirm brach der Empfang der GRAW-Sonden noch in großer Höhe über den Boden ab. Die letzten Datenpunkte der Fallsonden wurden in 4.8 km bzw. 7 km Höhe empfangen, die DFM06 Radiosonde sendete Daten bis in etwa 2.8 km Höhe. Der Vergleich zu der Drop-Up-Sonde ist somit auf den Höhenbereich zwischen 3 km und 12 km beschränkt. Das Tandem landete in etwa 70 km Entfernung an der Neuen Messe Stuttgart ( $9.1874^\circ$  Ost,  $48.6914^\circ$  Nord) in der Nähe des Stuttgarter Flughafens, wurde dort gefunden und an das Institut zurückgeschickt.

Die Fallprofile von Temperatur und relative Feuchte zeigen etwas geringere Abweichungen der GRAW-Sonden von der Drop-Up-Sonde als noch beim Aufstieg (Abb. 3.15).

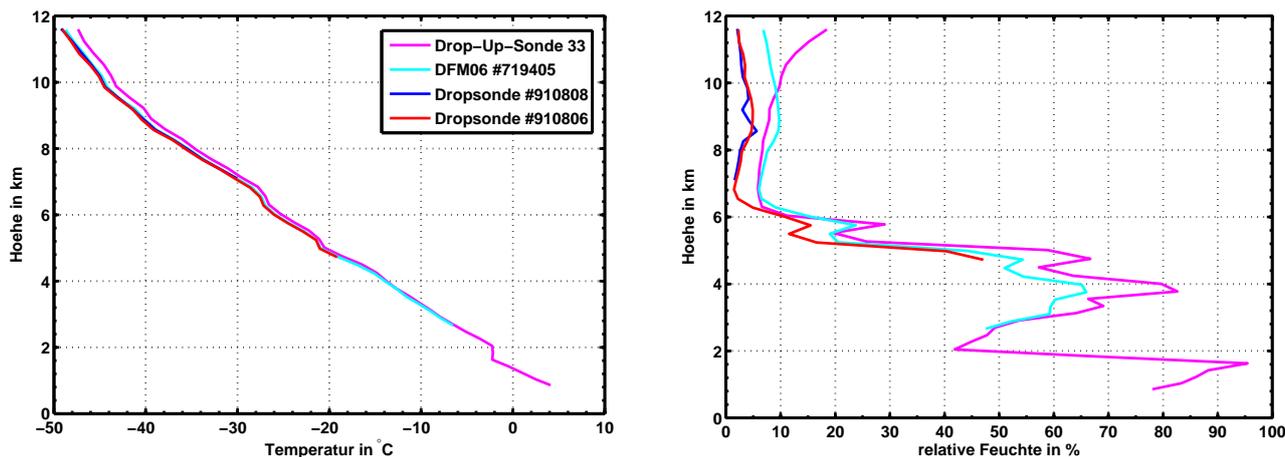


Abb. 3.15: Links: Fallprofil der Temperatur aus 12 km Höhe am 03.11.2009, 12 UTC. Rechts: Fallprofil der relativen Feuchte.

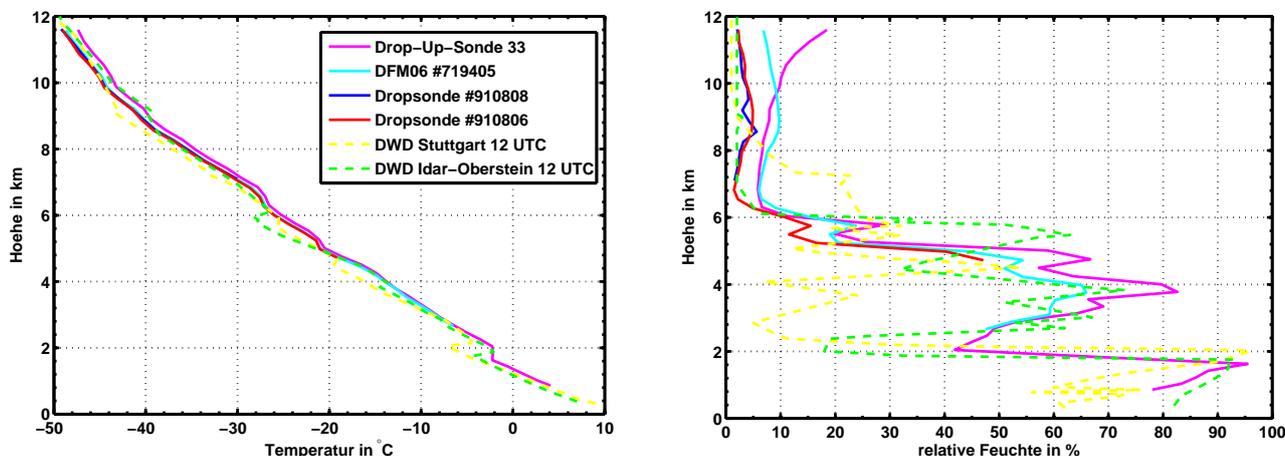


Abb. 3.16: Links: Fallprofil der Temperatur aus 12 km Höhe am 03.11.2009, 12 UTC, mit den Radiosondenaufstiegen der Stationen Idar-Oberstein 33 und Stuttgart-Schnarrenberg (gestrichelt). Rechts: Fallprofil der relativen Feuchte.

Die Drop-Up-Sonde misst zwischen 6 km und 12 km Höhe eine höhere Temperatur als die GRAW-Sonden. Die Abweichungen sind aber mit maximal 2 K in 12 km Höhe deutlich kleiner als beim Aufstieg (Abb. 3.17, links) und nicht mehr (so stark) von dem Taupunktspiegelhygrometer beeinflusst. Die Temperaturabweichungen der GRAW-Sonden untereinander ist geringer als beim Aufstieg und sind maximal 0.6 K in 12 km Höhe und unterhalb von 10 km Höhe kleiner als 0.3 K. Vermutlich liegt die Ursache für diesen Unterschied zwischen Aufstieg und Fall in der Ausrichtung der Sensoren nach unten. Die Styroporisolierung und die sich erwärmende Sondenelektronik könnten beim Aufstieg Wärme direkt an die Sensoren unterhalb der Isolierung abgeben und damit die Messungen beeinflussen, ähnlich der Beeinflussung der Temperaturmessung der Drop-Up-Sonde durch das Taupunktspiegelhygrometer im Strömungskanal. Ab etwa 5 km Höhe messen die GRAW-Sonden innerhalb der Standardabweichung der Drop-Up-Sonde. Die Temperaturstrukturen während des Falls werden von allen Sonden gleich gemessen.

Die Feuchtemessung der Drop-Up-Sonde scheint erst ab einer Höhe von 8 km bis zum Boden wieder verlässlich (Abb. 3.17, rechts) zu sein. Direkt nach der Ballonabtrennung zeigt sich plötzlich ein Bereich höherer Feuchte zwischen 10 km und 12 km Höhe als beim Aufstieg, was mit einer Umkehrung der Strömungsrichtung zusammenhängen könnte. Mit der Zunahme der Feuchte unterhalb von 6 km Höhe misst die Drop-Up-Sonde den gleichen Verlauf wie die GRAW-Sonden mit höheren Feuchtwerten (Abb. 3.15, rechts). Die Abweichungen erreichen bis zu 20 % relative Feuchte. Der Vergleich zu den DWD-Aufstiegen zeigt Ähnlichkeiten zur Sondierung der Station Idar-Oberstein der gemessenen Temperatur- und Feuchteprofile (Abb. 3.16). Durch die Verlagerung der Sonden nach Osten zeigen sich erste Ähnlichkeiten im Feuchteprofil zu der Stuttgarter Messung zwischen 5 km und 6 km Höhe.

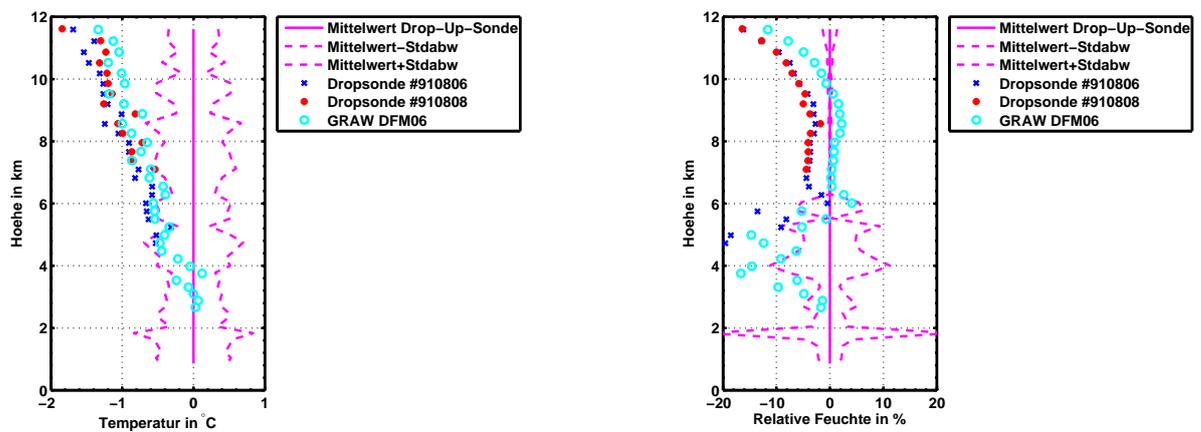


Abb. 3.17: Abweichung der Mittelwerte von der Drop-Up-Sonde der Temperatur (links) und der relativen Feuchte (rechts).

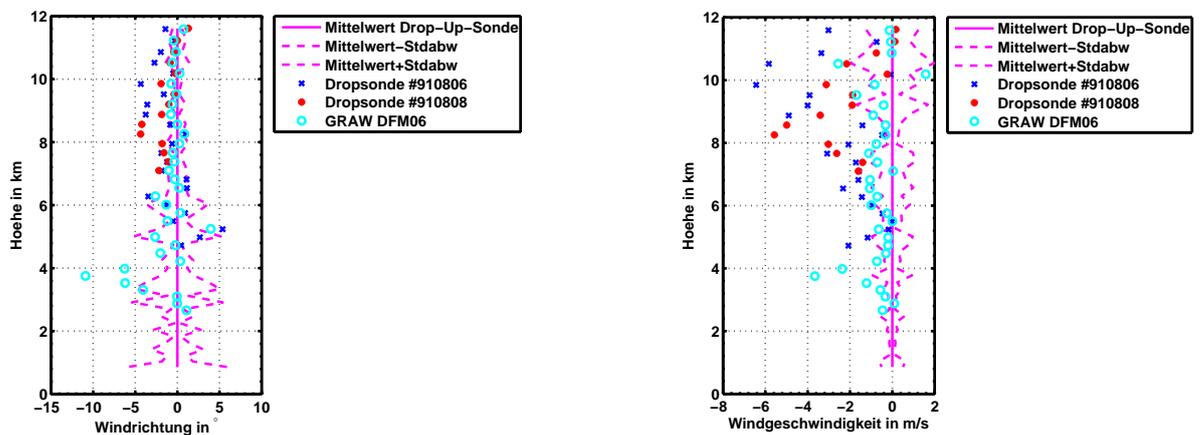


Abb. 3.18: Abweichung der Mittelwerte von der Drop-Up-Sonde der Windrichtung (links) und Windgeschwindigkeit (rechts).

Die Windgeschwindigkeit berechnen die Fallsonden oberhalb von 8 km Höhe bis zu  $6 \text{ ms}^{-1}$  geringer als die Drop-Up-Sonde (Abb. 3.18, rechts). Im Bereich der größten Abweichungen der Windrichtung bis zu  $5^\circ$  finden sich auch die größten Abweichungen von der Windgeschwindigkeit bis zu  $6 \text{ ms}^{-1}$  (Abb. 3.18). Unterhalb von 8 km Höhe nimmt die Abweichung der Windrichtung bzw. Windgeschwindigkeit auf Werte kleiner  $5^\circ$  bzw. kleiner  $3 \text{ ms}^{-1}$  von der Drop-Up-Sonde ab. Die beiden Fallsonden zeigen während des Falls Abweichungen bis zu  $3 \text{ ms}^{-1}$  untereinander, die aber nicht auf Unregelmäßigkeiten in den GPS-Daten oder Ausfallwerte zurückzuführen sind. Die DFM06 Radiosonde zeigt während des Falls, mit Ausnahme des Bereichs in 4 km Höhe, eine gute Übereinstimmung mit der Drop-Up-Sonde. Die Abweichungen liegen meist innerhalb der Standardabweichung der Drop-Up-Sonde. In 4 km Höhe zeigt die DFM06 Radiosonde die größten Abweichungen von der Drop-Up-Sonde in Windrichtung (über  $10^\circ$ ) und Windgeschwindigkeit (etwa  $4 \text{ ms}^{-1}$ ), die durch eine schnellere Änderung der Windrichtung und Geschwindigkeit der DFM06 Radiosonde auftreten.

Die Fehlerraten aus den Profildaten wurden bis zum Empfangsabbruch der gesendeten Daten berechnet (Tab. 3.12). Die Fallsonde Nr. 910806 hat bei einem stabilen Empfang eine ähnlich geringe Ausfallrate wie die beiden anderen GRAW-Sonden. Diese geringen Fehler sind auf Decodierungsfehler oder fehlerhafte Messungen zurückzuführen. Auffällig sind die Fehler bei der geographischen Länge im GPS-Signal. Der Fehler der geographischen Länge beeinflusst die Berechnung der Windrichtung oder Windgeschwindigkeit nicht. Die Fehlerraten sind nicht direkt miteinander vergleichbar, da der Empfangsabbruch der GRAW-Sonden in unterschiedlichen Höhen und damit zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftrat.

Tab. 3.12: Übersicht der Übertragungsfehler in Prozent aus den Profildaten während des Falls des ersten Tandemaufstiegs am 03.11.2009.

Variable	Nr. 910806	Nr. 910808	DFM06
Temperatur	0.0	0.0	0.0
Relative Feuchte	0.0	0.0	0.04
Windrichtung	0.60	0.04	0.0
Windgeschwindigkeit	0.60	0.04	0.0
Position Länge	7.68	0.0	6.42
Position Breite	0.0	0.0	0.0
Position Höhe	0.0	0.0	0.0

### 3.2.2 Zweiter Tandemaufstieg, Donnerstag, 05.11.2009

Der Start des Tandems erfolgte kurz nach 12 UTC, bei der folgende Sonden zum Einsatz kamen:

- Karlsruher Drop-Up-Sonde Nr. 27
- Fallsonde Nr. 910788
- Fallsonde Nr. 910809
- DFM06 Radiosonde Nr. 719431

Das Gespann wurde bei einer Temperatur von 11.8 °C und etwa 60 % relative Feuchte bei schwachem Wind ( $2 \text{ ms}^{-1}$ ) und 8/8 Bewölkung gestartet. Die Fallsonde Nr. 910809 maß in den untersten 1600 m nach dem Start aufgrund eines defekten Antennenkabels fehlerhafte Werte, die bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurden.

Das Temperaturprofil geben alle Sonden in etwa gleich gut wieder. Die Abweichungen der Drop-Up-Sonde betragen schon seit dem Start etwa 0.7 K von den Fallsonden und etwa 1 K von der DFM06 Radiosonde, wobei die Drop-Up-Sonde die höchste Temperatur misst (Abb. 3.21, links). Ab etwa 2 km Höhe messen die Drop-Up-Sonde und beide Fallsonden die gleiche Temperatur, bis etwa 4 km sind die Abweichungen kleiner als 0.2 K. Die DFM06 Radiosonde löst die Temperaturstruktur mit einem schwächeren Temperaturgradienten zwischen 2 km und 2.3 km Höhe nicht auf, sondern zeigt in diesem Bereich eine kontinuierliche Temperaturabnahme mit der Höhe und misst bis zu 2 K geringere Temperaturen als die Fallsonden und die Drop-Up-Sonde (Abb. 3.21, links). Ab 4 km misst die Drop-Up-Sonde mit zunehmender Höhe die höchsten Temperaturen. Die Abweichungen sind wieder auf die Abwärme des Taupunktspiegelhygrometers, das sich in der Folge sogar bis über die Umgebungstemperatur erwärmt, im Strömungskanal zurückzuführen. Die maximale Abweichung hat die DFM06 Radiosonde mit einer Differenz von fast 4 K in 12 km Höhe zur Drop-Up-Sonde. Die Fallsonden haben eine maximale Abweichung von etwa 2.5 K von der Drop-Up-Sonde. Die Differenzen zwischen der DFM06 Radiosonden und den Fallsonden sind ca. 1 K bis 1.5 K, wobei die DFM06 Radiosonde die niedrigsten Temperaturen misst. Aufgrund der gleichen Sensorausrichtung nach unten wie beim ersten Tandemaufstieg könnte in diesem Aufstieg eine Beeinflussung der Temperatursensoren durch die sich erwärmende Sondenelektronik und Styroporisolierung, die Abweichungen zwischen den GRAW-Sonden erklären. Der Temperaturverlauf wurde von allen GRAW-Sonden fast identisch gemessen, allerdings mit einer fast konstanten Differenz im Messwert.

Das Profil der relativen Feuchte messen die Fallsonden meist mit niedrigeren Werten als die Drop-Up-Sonde. Die Drop-Up-Sonde misst in etwa 1.6 km bis 2 km Höhe einen Wolkendurchflug mit Werten von 100 % relative Feuchte (Abb. 3.21, rechts). Die Fallsonden erreichen die höchsten Messwerte in diesem Bereich mit über 90 % relative Feuchte. Die Differenz der Messwerte zwischen den Fallsonden ist kleiner als 2 % relative Feuchte.

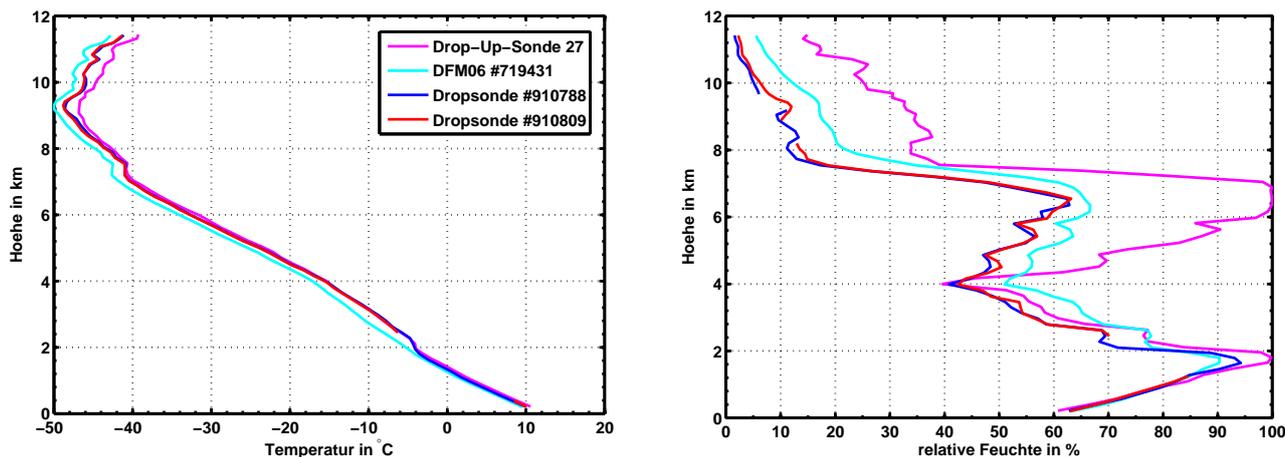


Abb. 3.19: Links: Temperaturprofil des zweiten Tandemaufstiegs am 05.11.2009, 12 UTC. Rechts: Profil der relativen Feuchte.

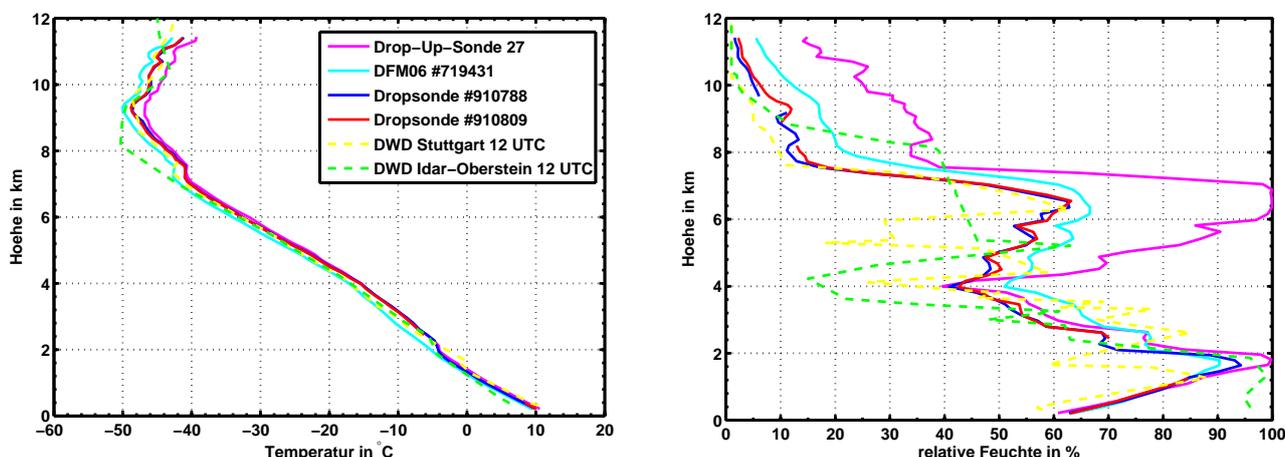


Abb. 3.20: Links: Temperaturprofil des ersten Tandemaufstiegs am 05.11.2009, 12 UTC, mit Radiosondenaufstiegen des DWD in Idar-Oberstein und Stuttgart-Schnarrenberg (gestrichelt). Rechts: Profil der relativen Feuchte.

Nach dem Durchflug der Wolken messen alle GRAW-Sonden Werte um 60 % relative Feuchte. Die Drop-Up-Sonde misst oberhalb der Wolke eine deutlich höhere relative Feuchte und steigt zwischen 6 km und 7 km Höhe nochmal auf 100 % relative Feuchte und lässt einen erneuten Durchflug einer Wolke vermuten. Die GRAW-Sonden messen den starken Anstieg nicht, messen aber einen ähnlich strukturierten Verlauf der Feuchte mit geringeren Absolutwerten (Abb. 3.21, rechts). Der Helligkeitssensor der Drop-Up-Sonde, mit dem Wolkenobergrenzen abgeschätzt werden können, zeigt kein typisches Signal einer Wolkenoberseite zwischen 6 km und 7 km Höhe (nicht gezeigt, persönliche Mitteilung Holger Mahlke). Eine mögliche Erklärung könnte eine Verschmutzung durch Tropfen oder Eis des Spiegels des Taupunktspiegelhygrometers sein, die sich nach dem Wolkendurchflug in der Lufthutze oder dem Strömungskanal angelagert hat und damit zu der Zunahme der relativen Feuchte führt, bis sich der Spiegel über die Umgebungstemperatur aufheizt, um Tropfen von der Spiegeloberfläche zu verdunsten. Die GRAW-Sonden

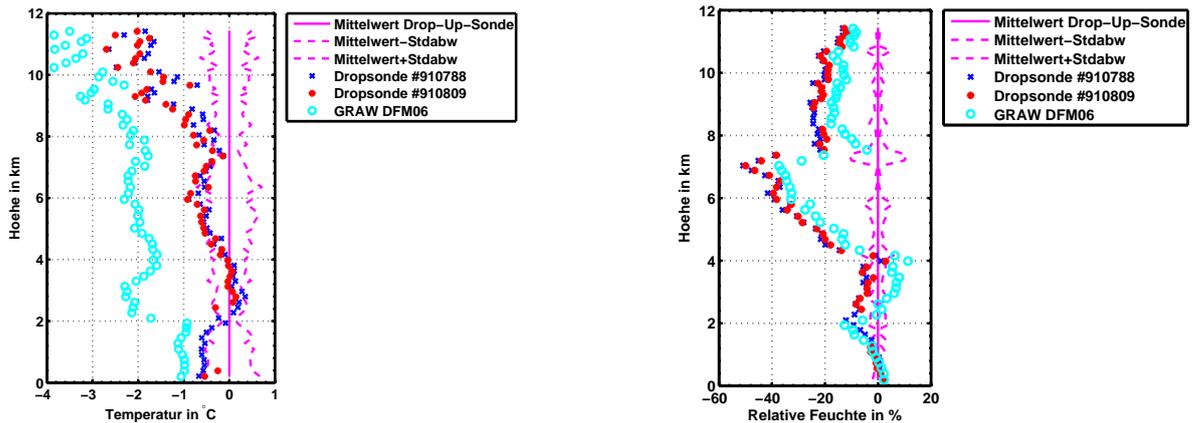


Abb. 3.21: Abweichung der Mittelwerte von der Drop-Up-Sonde von Temperatur (links) und relativer Feuchte (rechts).

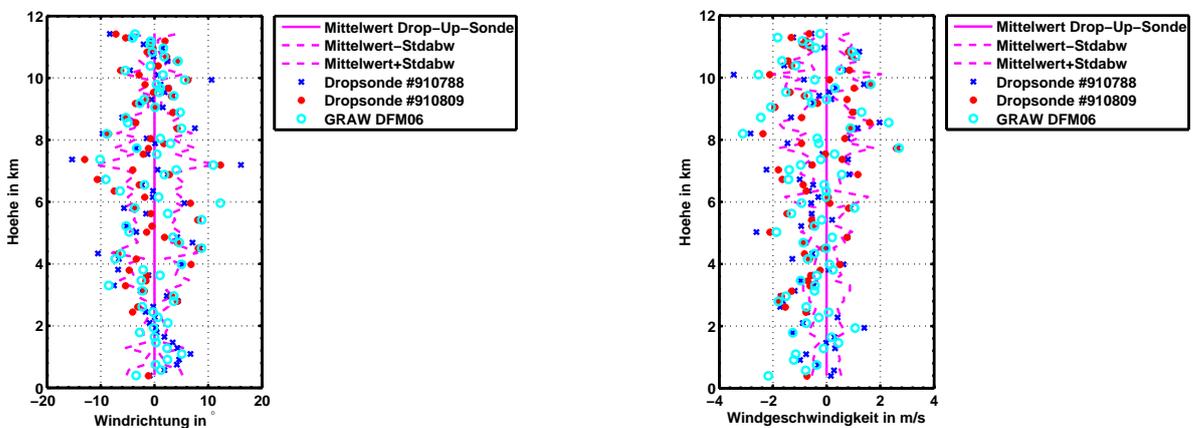


Abb. 3.22: Abweichung der Mittelwerte von der Drop-Up-Sonde von Windrichtung (links) und Windgeschwindigkeit (rechts).

messen im Vergleich zur Drop-Up-Sonde bis in 4 km Höhe eine Feuchtedifferenz zwischen  $\pm 12\%$  relative Feuchte.

Im Bereich des Anstiegs der relativen Feuchte auf 100 % zwischen 4 km und 7 km Höhe steigen die Abweichungen der GRAW-Sonden von der Drop-Up-Sonde auf bis zu 50 % relative Feuchte an. Alle GRAW-Sonden messen in diesem Höhenbereich nur einen leichten Feuchteanstieg bis etwa 62 % bzw. 66 % relative Feuchte. Die Feuchteabnahme messen alle Sonden in 7 km Höhe, aber mit unterschiedlichen Absolutwerten. Der Verlauf des Feuchteprofils oberhalb von 8 km weist zwischen allen Sonden Ähnlichkeiten auf, die langsame Abnahme der Feuchte ist in allen Messungen zu finden (Abb. 3.20, rechts). Die gemessenen Feuchtwerte der Fallsonden weichen bis zu 20 % relative Feuchte von der Drop-Up-Sonde ab. Das Feuchteprofil der DFM06 Radiosonde liegt zwischen dem Profil der Fallsonde und der Drop-Up-Sonde. Die Feuchtemessung der Drop-Up-Sonde oberhalb von 7 km Höhe lässt auf Probleme der Taupunktmessung bei tiefen Temperaturen schließen (Nash et al., 2006).

Der Vergleich mit den Radiosondenaufstiegen des DWD (Abb. 3.20) zeigt eine gute Übereinstimmung des Temperaturprofils mit der Station Stuttgart-Schnarrenberg. Das Profil der relativen Feuchte der Stuttgarter Messung bestätigt den Feuchteverlauf der GRAW-Sonden zwischen 4 km und 7 km und zeigt den Anstieg auf 100 % relative Feuchte der Drop-Up-Sonde nicht. Die Station Idar-Oberstein zeigt zwischen 7 km und 9 km Höhe einen unterschiedlichen Verlauf der Temperatur als die Messungen des Stuttgarter Aufstiegs und des Gespanns vom KIT Campus Nord. Das Feuchteprofil der Station Idar-Oberstein zeigt zwischen 5 km und 9 km Höhe deutliche Unterschiede im Vergleich zu den Messungen des Stuttgarter Aufstiegs und den Tandem vom KIT Campus Nord. Die Unterschiede und Ähnlichkeiten können mit der unterschiedlichen Startposition und der vorherrschenden Windrichtung zusammenhängen, die während der Sondierung bis in 12 km Höhe etwa konstant bei  $241^\circ$  war.

Die aus den GPS-Daten abgeleiteten Größen Windrichtung und Windgeschwindigkeit zeigen bei diesem Aufstieg eine größere Streuung als im ersten Aufstieg zwei Tage zuvor. Im Mittel über den gesamten Aufstieg zeigt die Fallsonde Nr. 910788 eine vernachlässigbare Abweichung in der Windrichtung von  $0.07^\circ$ , streut aber  $\pm 15^\circ$  um die berechnete Windrichtung der Drop-Up-Sonde. Die Fallsonde Nr. 910809 und die DFM06 Radiosonde zeigen ein ähnliches Verhalten, die maximalen Differenzen sind etwas geringer ( $\pm 12^\circ$ ). Meist liegen die Abweichungen innerhalb von  $\pm 10^\circ$ . Die Windrichtung war während des gesamten Tandemflugs konstant  $241^\circ$ . Die Windgeschwindigkeit liegt für alle GRAW-Sonden bis auf wenige Punkte innerhalb  $\pm 2.5 \text{ ms}^{-1}$ . Im Mittel werden über den Aufstieg für die GRAW-Sonden Abweichungen von  $-0.37 \text{ ms}^{-1}$  (Fallsonde Nr. 910788),  $-0,41 \text{ ms}^{-1}$  (Fallsonde Nr. 910788) und  $-0,44 \text{ ms}^{-1}$  (DFM06) von der Windgeschwindigkeit berechnet. Die GPS-Berechnungen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung sind für die neuen Fallsonden als genauer anzunehmen, aufgrund der neueren GPS-Technik. Im Mittel sind die Abweichungen aber gering.

Die Empfangsbedingungen während des Aufstiegs waren gut. Die Fallsonde Nr. 910809 hatte nach dem Start einen Datenausfall, der durch ein defektes Antennenkabel verursacht wurde. Nach einer Überprüfung des Kabels nach dem ersten Aufstieg am Dienstag zeigten sich donnerstags während der Vorbereitungen keine Einschränkungen beim Empfang vor dem Start. Die Profildaten sind bis auf den Datenausfall fast vollständig vorhanden (siehe Tab. 3.13). Es ergibt sich ein ähnliches Ergebnis wie beim ersten Aufstieg. Bei einem guten Empfang funktioniert die Decodierung des SONDENSIGNALS zu physikalischen Werten problemlos. Die Fallsonde Nr. 910788 sendete während des Aufstiegs fehlerhafte Werte in der geographischen Länge. Diese fehlerhaften Werte wirkten sich nicht auf die Berechnung der Windrichtung und Windgeschwindigkeit aus. Der Datenausfall der Fallsonde Nr. 910809 ist auf das defekte Antennenkabel zurückzuführen. Die Profildaten der DFM06 Radiosonde enthalten keine Fehler.

Der Empfang auf der Fallstrecke war für alle GRAW-Sonden bis knapp unter 2 km Höhe möglich (Abb. 3.23). Die Sonden landeten in 50 km Entfernung in Barga (Odenwald) in einem Wohngebiet ( $9.0232^\circ$  Ost,  $49.3098^\circ$  Nord). Am Folgetag sammelte eine Suchmannschaft die Sonden wieder ein. Die bodennahen Positionsmeldungen der Drop-Up-Sonde und die Endposition, die per SMS übertragen wurde, stimmten mit dem Fundort überein. Die Landung beschädigte den exponierten Sensorträger und die

Tab. 3.13: Übersicht der Übertragungsfehler in Prozent aus den Profildaten des zweiten Tandemaufstiegs am 05.11.2009.

Variable	Nr. 910788	Nr. 910809	DFM06
Temperatur	0.0	16.05	0.0
Relative Feuchte	0.0	20.38	0.0
Windrichtung	0.0	16.57	0.0
Windgeschwindigkeit	0.0	16.57	0.0
Position Länge	3.40	15.24	0.0
Position Breite	0.0	15.24	0.0
Position Höhe	0.0	15.24	0.0

Antennenführung beider Fallsonden, die DFM06 Radiosonde und die Drop-Up-Sonde waren unversehrt. Auf einen mechanischen Schutz der Sensoren wurde zugunsten einer möglichst ungestörten Anströmung verzichtet. Der Empfang der GRAW-Sonden brach in etwa zur gleichen Zeit ab, somit ist ein Datenverlust aufgrund von leeren Batterien auszuschließen. Nach der Landung des Tandem und dem Eingang der Positionsdaten per SMS wurde die Datenaufzeichnung an den GRAW-Empfängern beendet. Das Temperaturprofil des Falls aus 12 km Höhe zeigt einen ähnlichen Verlauf wie schon zwei Tage zuvor (Abb. 3.23, links). Die Temperaturmessung der Drop-Up-Sonde misst während des gesamten Profils die höchsten Temperaturen, die Abweichungen nehmen von 2.5 K in 12 km Höhe bis etwa 0.5 K in etwa 3 km Höhe ab (Abb. 3.25, links). Die Fallsonden und die DFM06 Radiosonde messen im Fall eine geringere Differenz zueinander. Die Abweichungen zwischen der DFM06 Radiosonde und den Fallsonden sind etwa 0.2 K und kleiner. Dies bestärkt die Vermutung, dass die Sensorposition der Tandemaufstiege beim Aufstieg für die Fallsonden nicht günstig war und Abwärme des Senders und Bauteile innerhalb der Styroporisolation die Temperaturmessung beeinflusst haben könnten.

Der Temperaturverlauf stimmt sehr gut mit dem DWD Aufstieg der Station Stuttgart-Schnarrenberg überein. Die Temperaturstruktur zwischen 2 km und 2.3 km mit dem kleineren Temperaturgradienten wird von allen Sonden aufgelöst, die DFM06 Radiosonde misst im Fall diese Struktur, aber nicht im Aufstieg (Abb. 3.23, links).

Das Fallprofil der relativen Feuchte der Drop-Up-Sonde zeigt zwischen 7.5 km und 12 km Höhe einen deutlich anderen Verlauf mit Abweichungen bis zu 30 % relative Feuchte von den GRAW-Sonden (Abb. 3.23, rechts) und im Vergleich zum Aufstieg (Abb. 3.19, rechts). Dieser Unterschied tritt wieder direkt nach der Abtrennung des Ballons und der Umkehrung der Strömungsrichtung durch den Kanal auf. Unterhalb von 7.5 km messen alle Sonden den gleichen Feuchteverlauf, aber mit deutlichen Differenzen im Absolutwert zwischen der Drop-Up-Sonde und den GRAW-Sonden. Zwischen 6 km und 7 km Höhe misst die Drop-Up-Sonde wie beim Aufstieg wieder hohe Feuchtwerte über 90 % relative Feuchte. Die GRAW-Sonden messen während des Falls in etwa das Aufstiegsprofil mit Feuchtwerten um 60 %

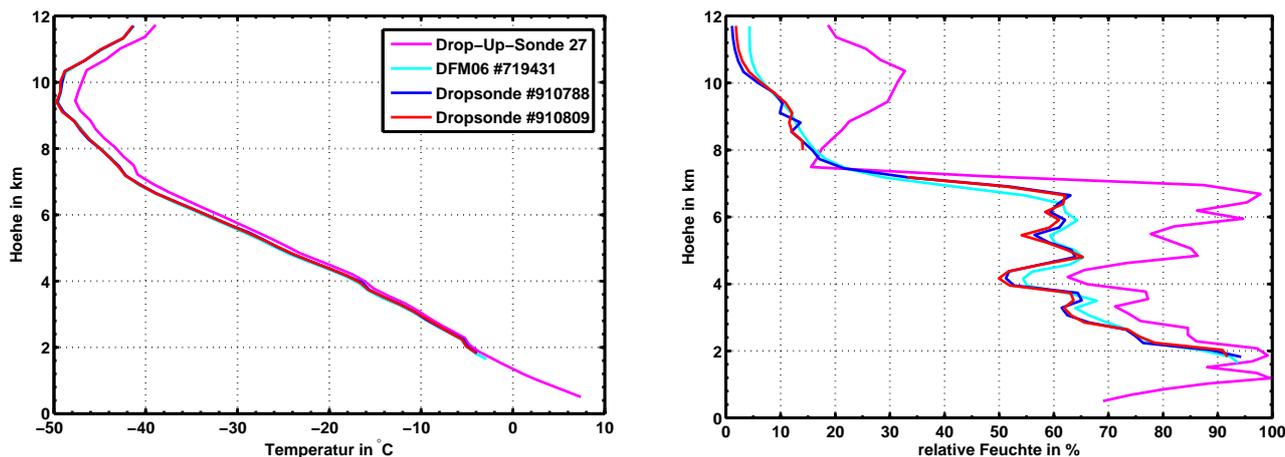


Abb. 3.23: Links: Fallprofil der Temperatur aus 12 km Höhe am 05.11.2009, 12 UTC. Rechts: Fallprofil der relativen Feuchte.

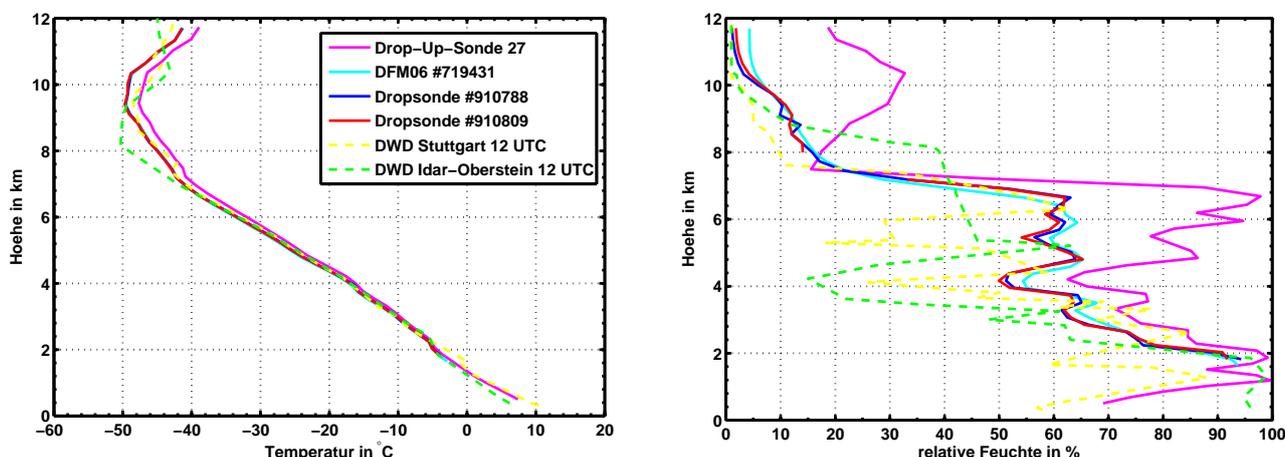


Abb. 3.24: Links: Fallprofil der Temperatur aus 12 km Höhe am 05.11.2009, 12 UTC, mit Radiosondenaufstiegen des DWD in Idar-Oberstein und Stuttgart-Schnarrenberg (gestrichelt). Rechts: Fallprofil der relativen Feuchte.

relative Feuchte, dementsprechend sind die Abweichungen zur Drop-Up-Sonde mit bis zu 50 % relative Feuchte sehr groß. Unterhalb von 4 km Höhe sind die Abweichungen kleiner als 20 % relative Feuchte und nehmen mit abnehmender Höhe bis zu 10 % relative Feuchte ab.

Die DFM06 Radiosonde scheint beim Fall sehr träge zu reagieren. Feuchtestrukturen, die die Fallsonden auflösen, zeigt die DFM06 Radiosonde nicht im gleichen Maße und die Messwerte erscheinen stark geglättet (Abb. 3.23). Eine mögliche Erklärung kann die Schutzkappe des Feuchtesensors der DFM06 Radiosonde sein. Die Fallsonden messen ohne diese Schutzkappe, damit ist die Belüftung des Sensors besser.

Der Vergleich zu den DWD-Messungen zeigt auch im Fallprofil noch eine gute Übereinstimmung mit der Station Stuttgart-Schnarrenberg in der Temperatur- und Feuchtemessung (Abb. 3.23). Die DWD-Messungen zeigen den von der Drop-Up-Sonde gemessenen Bereich hoher Feuchte nicht. Eine Erklärung

für den Feuchteanstieg auf etwa 100 % relative Feuchte der Drop-Up-Sonde zwischen 6 km und 7 km Höhe fällt schwer, da ein Wolkendurchflug vom Helligkeitssensor nicht angezeigt wird. Auch die DWD-Messungen zeigen in diesem Höhenbereich keine so hohen Feuchtwerte und bestätigen die Messungen der GRAW-Sonden.

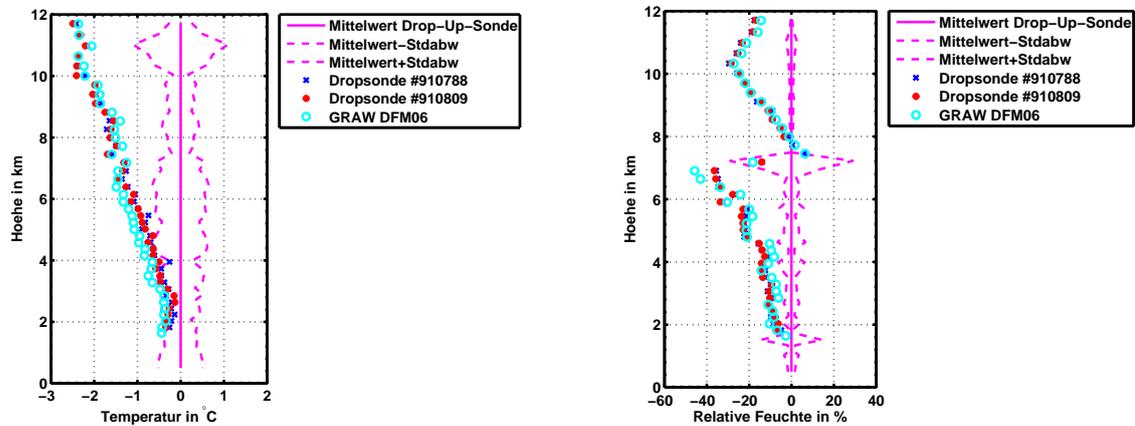


Abb. 3.25: Abweichung der Mittelwerte von der Drop-Up-Sonde von Temperatur (links) und relativer Feuchte (rechts) während des Falls.

Die Windrichtung, berechnet aus den GPS-Daten, zeigt eine Streuung von  $-7^\circ$  bis  $+5^\circ$  um die Werte der Drop-Up-Sonde (Abb. 3.26, links). Im Mittel sind die Abweichungen gering (Fallsonde Nr. 910788:  $-1.34^\circ$ , Fallsonde Nr. 910809:  $0.77^\circ$ , DFM06:  $-0.07^\circ$ ). Die Windgeschwindigkeit liegt meist in einem Intervall von  $\pm 1 \text{ ms}^{-1}$  um die Werte der Drop-Up-Sonde. Die Fallsonde Nr. 910788 zeigt die größte Streuung der Werte und auch die größte mittlere Abweichung von  $-0.4 \text{ ms}^{-1}$ . Die Abweichungen der Fallsonde Nr. 910809 und DFM06 Radiosonde sind mit  $-0.29 \text{ ms}^{-1}$  und  $-0.32 \text{ ms}^{-1}$  etwas geringer. Die Winddaten werden gut mit geringen Abweichungen wiedergegeben. Die Fallsonde Nr. 910788 zeigt ab 6 km bis zum Boden zum Teil größere Abweichungen von der Drop-Up-Sonde (Abb. 3.26, rechts). Die GPS-Daten dieser Sonde zeigen keine Unregelmäßigkeiten in den Positionsdaten auf. Eine mögliche Erklärung ist ein Unterschied in der GPS-Höhe zwischen der Fallsonden und der Drop-Up-Sonde. Damit kann sich bei der Mittelwertberechnung und Differenzenbildung über einen unterschiedlichen Höhenbereich eine Verschiebung bei der Darstellung ergeben.

Die Übertragungsfehler während des Falls sind gering. Die meisten Fehler treten in den Positionsangaben und deren abhängigen Größen auf (Tab. 3.14). Die Profildaten der Fallsonde Nr. 910788 beinhalteten falsche GPS-Werte in der geographischen Länge. Der Fehler trat jedoch nicht zeitgleich mit den oben schon angesprochenen größeren Abweichungen in den Winddaten auf. Bei dieser Messung zeigt sich, dass die GPS-Daten mehr Ausfälle zu verzeichnen haben als die Messungen der Temperatur und relativen Feuchte. Die Ausfälle der Daten der DFM06 sind auf schlechten Empfang zurückzuführen. Während die GPS-Informationen nicht mehr decodiert wurden, konnten die Temperatur- und Feuchtedaten noch empfangen und korrekt decodiert werden. Die Datenfehler der Fallsonde Nr. 910809 sind Messfehler

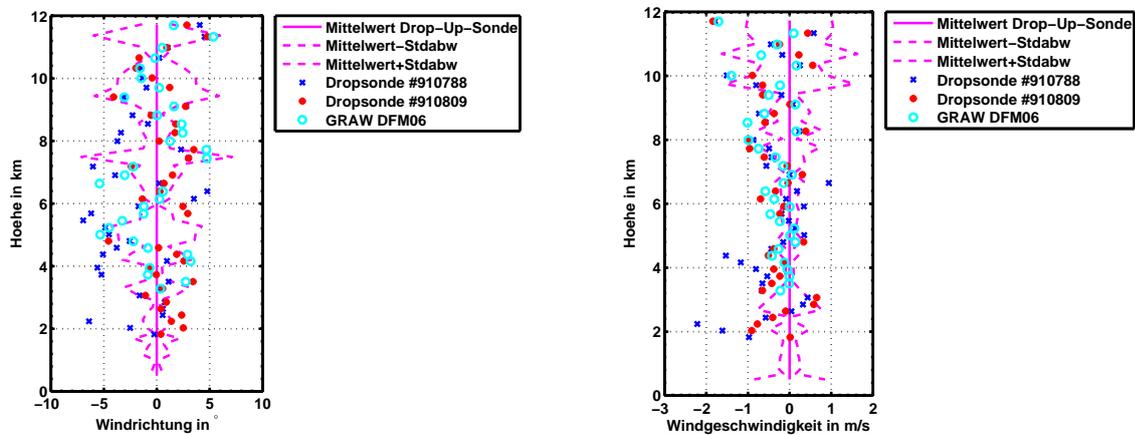


Abb. 3.26: Abweichung der Mittelwerte von der Drop-Up-Sonde von Windrichtung (links) und Windgeschwindigkeit (rechts).

Tab. 3.14: Übersicht der Übertragungsfehler in Prozent aus den Profildaten während des Falls des zweiten Tandemaufstiegs am 05.11.2009.

Variable	Nr. 910788	Nr. 910809	DFM06
Temperatur	0.0	0.0	0.0
Relative Feuchte	0.0	1.93	0.0
Windrichtung	0.0	3.27	8.56
Windgeschwindigkeit	0.0	3.27	8.56
Position Länge	3.84	0.0	7.79
Position Breite	0.0	0.0	4.41
Position Höhe	0.0	0.0	0.0

oder falsch decodierte Werte und waren als starke Ausreißer in den Daten vorhanden.

Die Vergleichsmessungen mit der Karlsruher Drop-Up-Sonde zeigen zum Teil große Abweichungen von der neuen Fallsonde. Die Temperaturmessung der Drop-Up-Sonde ist bei beiden Aufstiegen durch das Taupunktspiegelhygrometer beeinflusst. Eine Bewertung der Temperaturgenauigkeit der Fallsonde im Vergleich zur Drop-Up-Sonde ist damit schwierig. Der Vergleich der Fallsonden mit der DFM06 Radiosonde zeigt auch einen Unterschied in der Temperaturmessung zwischen Aufstieg und Fall. Die Differenzen der Temperaturwerte sind beim Fall geringer als beim Aufstieg. Die Ursache dafür könnte die ungünstige Ausrichtung der Sensoren der Fallsonden nach unten sein (Abb. 3.9). Die sich erwärmende Sonderelektronik und das Styroporgehäuse könnten während des Aufstiegs Wärme direkt an die Sensoren der Fallsonde weiterleiten und so zu einer erhöhten Temperatur und gleichzeitig zu einem meist beobachteten kleineren Feuchtwert führen, ähnlich der Problematik bei der Drop-Up-Sonde. Im zweiten Tandemflug zeigt die Feuchtemessung zwischen 4 km und 7 km Höhe der Drop-Up-Sonde einen starken Anstieg der Feuchte auf etwa 100 % relative Feuchte während des Aufstiegs und des Falls. Ein Wolken-durchflug wird durch den Helligkeitsmesser nicht angezeigt. Der Vergleich mit den zwei umliegenden DWD-Radiosondenstationen Idar-Oberstein und Stuttgart-Schnarrenberg bestätigen den GRAW-Sonden das gemessene Temperatur- und Feuchteprofil. Die Fallsonden messen bei beiden Tandemaufstiegen fast identische Profile der Temperatur und Feuchte, damit messen sie gleich gut. Der Vergleich der Windgrößen, berechnet aus den GPS-Daten, zeigen im Mittel geringe Abweichungen. Durch den moderneren GPS-Chip in der Fallsonde sollten die GPS-Daten der neuen Fallsonde qualitativ besser sein als die der Drop-Up-Sonde. Der Datenempfang war während der Aufstiege gut, Decodierungsfehler traten nur selten auf, die großen Datenlücken wurden durch das defekte Antennenkabel verursacht. Bei Fall sind die Fehlerraten etwas höher, was auf einen schlechter werdenden Empfang zurückzuführen ist. Auffällig ist, dass während des Falls mehr Ausfälle in den GPS-Daten zu finden sind, die aufgrund ihrer größeren Länge fehleranfälliger sind als die Temperatur- und Feuchtedaten.

### 3.3 Vergleichsmessung mit der Vaisala RS92 Radiosonde

Eine Vergleichsmessung mit der Vaisala RS92 Radiosonde als Referenzsonde wurde durchgeführt, da diese Radiosonde weltweit bei vielen Wetterdiensten im operationellen Betrieb eingesetzt wird. Die RS92 Radiosonde verwendet zur Feuchtemessung den gleichen Feuchtesensor, wie er in der Fallsonde RD93 eingesetzt wird. Die Heizfunktion des Feuchtesensors zur Entfernung von Anlagerungen von Wasser oder Eis ist jedoch nur in der Vaisala RS92 Radiosonde aktiv. Die Vergleichsmessungen fanden in Lindenberg (ca. 65 km südöstlich von Berlin) im Richard-Assmann-Observatorium des DWD vom 01.12.2009 bis 02.12.2009 statt. Die Aufstiege wurden zusammen mit Herrn Horst Dier und den diensthabenden Mitarbeitern für Radiosondenaufstiege des DWD durchgeführt. Insgesamt wurden vier Vergleichsflüge mit folgender Bestückung durchgeführt.

- 01.12.2009 12 UTC, 2 Fallsonden, 1 DFM06, 1 Vaisala RS92
- 01.12.2009 18 UTC, 1 Fallsonde, 1 Vaisala RS92
- 02.12.2009 00 UTC, 2 Fallsonden, 1 DFM06, 1 Vaisala RS92 als Nachstart
- 02.12.2009 12 UTC, 2 Fallsonden, 1 DFM06, 1 Vaisala RS92 als Nachstart

Die Messungen am 01.12.2009 wurden direkt mit der offiziellen Messung gestartet, die Messungen am 02.12.2009 jeweils als Nachstart. Die Messungen als Nachstart wurden als separates Gespann kurz nach der offiziellen Messung gestartet und waren somit unabhängig von der offiziellen Messung. Die Anordnung der Sonden entsprach in etwa der Anordnung der Tandemflüge am KIT Campus Nord (Abb. 3.9). An einer horizontalen Stange wurden die Fallsonden links und rechts fixiert, die Sensoren zeigten nach unten. Die Fallsonden wurden ohne Schutzkappe für den Feuchtesensor geflogen. Die Sensorausrichtung wurde nach dem ersten Flug verändert, da die Fallsonden während des Aufstiegs im Vergleich zur Vaisala und DFM06 Radiosonde zu hohe Temperaturen gemessen hatten. Die Abweichungen sind zu groß, um sie allein durch den Strahlungsfehler bei Aufstiegen tagsüber erklären zu können. Der Temperaturerhöhung durch Strahlung wird mit +0.5 K in der Troposphäre und bis zu 1 K in der Stratosphäre (Nash et al., 2006) bei Aufstiegen tagsüber abgeschätzt und würde alle Sonden in etwa gleich beeinflussen. Im Verdacht steht die Erwärmung der Sonderelektronik und des Senders in der Styroporisolierung, die während des Aufstiegs in der Höhe Wärme abgeben, die dann direkt am Temperatursensor vorbei geleitet wurde. Die Fallsonde wurde daher um 90° gedreht, sodass die Sensoren zur Seite zeigten und ungestört von oben und von unten angeströmt werden konnten. Diese Maßnahme hatte einen kleinen Einfluss auf die Signalstärke des 400 MHz-Senders und das GPS-Signal, da die nun horizontal liegende GPS-Antenne einen schlechteren Satellitenempfang hatte. Die Anzahl von empfangenen Satelliten war jedoch bei jedem Aufstieg ausreichend und immer deutlich größer 4, meist 6 Satelliten und mehr. Die Ergebnisse des zweiten Fluges zeigten eine Verbesserung der Temperaturmessung im Vergleich zum ersten Flug. Für die weiteren Flüge wurde daher die neue Montageposition beibehalten. Alle Aufstiege erreichten Höhen zwischen 22 km und 35 km und damit eine weit größere Höhe als für die Fallsonden

notwendig ist. Das GPS-Modul wurde bei diesem Aufstieg außerhalb seiner technischen Spezifikationen betrieben (Tab. 2.5). Der Hersteller des GPS-Moduls gibt eine maximale Höhe von 18 km und eine minimale Betriebstemperatur von  $-40\text{ °C}$  an. Beim Betrieb außerhalb dieser Grenzen muss mit Fehlern und Empfangsverlust gerechnet werden. Dieses Verhalten zeigte sich vor allem in der Nähe des Ballonplatzpunktes im Bereich der maximalen Höhe und führte trotz gutem Empfang zu einem plötzlichen Ausfall der GPS-Daten. Während des Falls war die Wiederaufnahme des GPS-Empfangs vereinzelt möglich. Es kam aber auch vor, dass die GPS-Daten der letzten gültigen Position als konstante Werte weiter gesendet wurden. Bei der Datenauswertung wurden diese auffälligen Datenbereiche herausgenommen und mit NaN-Werten ersetzt. Für die Auswertung wird der Einsatzbereich der Fallsonde zwischen 0 km und 14 km Höhe betrachtet.

Die Empfangsanlagen für die GRAW-Sonden konnten nahe am Startpunkt neben der Ballonhalle aufgebaut werden. Die Funkfrequenzen der GRAW-Sonden wurden mit dem DWD so abgestimmt, dass Frequenzen für die Hauptmessung und einen eventuellen Nachstart frei blieben. Als Bodenwerte für die Sonden wurden die vom DWD mitgeteilten Werte am Startplatz übernommen.

### **3.3.1 Erster Aufstieg, 01.12.2009, 12 UTC**

Erstaunlicherweise zeigten sich im Frequenzband starke Nebenkeulen des Senders der Fallsonde Nr. 910798, die die Messungen der DWD-Sonden störte. Eine Änderung der Funkfrequenz dieser Sonde schaffte Abhilfe, die Nebenkeulen waren im Frequenzbereich aber noch sichtbar. Durch die Reinitialisierung verlor die Fallsonde Nr. 910798 aber den GPS-Empfang und startete ohne gültiges GPS-Signal. Die Sonde sendete daher erst ca. zwei Minuten nach dem Start die ersten Positionsdaten. Diese Verzögerung der GPS-Übertragung hatte Auswirkungen auf die Berechnungen der Winddaten, die etwa eine Minute nachdem der GPS-Empfang einsetzte, berechnet wurden. Das Tandem wurde mit den Bodenwerten am Startplatz mit einer Temperatur von  $5.5\text{ °C}$  und  $96\%$  relative Feuchte bei bedecktem Himmel (8/8) und leichtem Niederschlag gestartet. Die Datenaufzeichnung am Empfänger der Fallsonde Nr. 910798 brach während des Aufstiegs in einer Höhe von etwa 14 km plötzlich ab. Entsprechend der Signalanzeige am Empfänger schien der Datenempfang immer noch möglich und gut zu sein. Nach dem Ballonplatzpunkt in knapp 35 km Höhe wurde der Datenempfang am Empfänger gestoppt und die tabellarischen Profildaten gesichert. Ein Neustart des Datenempfangs war erfolgreich und Daten der Sonde konnten während des Falls wieder empfangen werden. Von der Fallsonde Nr. 910803 und der DFM06 Radiosonde konnten Messdaten bis zur maximalen Höhe empfangen werden.

Auffällig ist bei diesem Aufstieg der Anstieg der gemessenen Temperaturen von beiden Fallsonden ab etwa 4.2 km Höhe im Vergleich zu den Radiosonden DFM06 und Vaisala RS92 (Abb. 3.27 und 3.28, jeweils links). Diesen Temperaturanstieg könnte die Abwärme der Sonderelektronik und des Senders in der Styroporisolierung oberhalb der Sensoren verursacht haben, indem sie die Wärme während des Aufstiegs langsam an die Umgebungsluft abgaben, die direkt an den Temperatursensoren unterhalb vorbei strömt. Die Temperaturen der Fallsonden weichen von der Vaisala Sonde bis in 4.2 km im Mittel bis

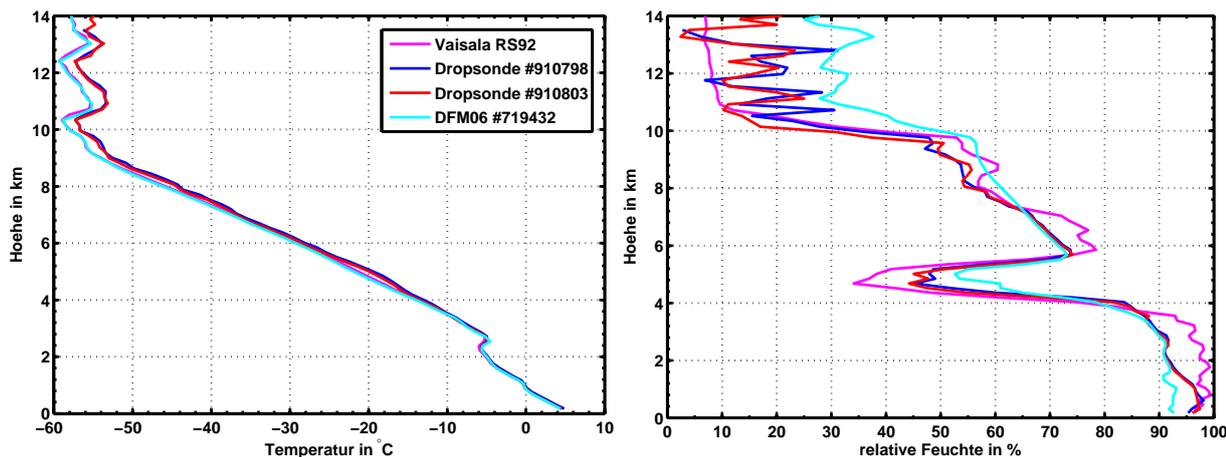


Abb. 3.27: Links: Temperaturprofil des ersten Aufstiegs am 01.12.2009, 12 UTC, bis 14 km Höhe. Rechts: Profil der relativen Feuchte.

zu 0.32 K (Fallsonde Nr. 910798) und 0.05 K (Fallsonde Nr. 910803) ab. Oberhalb von 4.2 km Höhe nehmen die Temperaturabweichungen mit der Höhe zu. Die Fallsonde Nr. 910803 erreicht die maximale Abweichung von +3.2 K von der Referenzsonde in 12.6 km Höhe, die Fallsonde Nr. 910798 von etwa 3 K in 11 km Höhe. Die Abweichungen sind zu groß, um sie allein durch den Strahlungsfehler bei einem Tagesaufstieg zu erklären.

In etwa 1 km Höhe misst die Vaisala Sonde in einem Höhenbereich von 150 Metern eine Temperaturinversion. Die GRAW-Sonden lösen die Inversion nur mit einem schwächeren Temperaturgradienten in diesem Bereich auf. Eine zweite Inversion zwischen 2.3 und 2.7 km Höhe messen alle Sonden ähnlich. Die Vaisala Sonde misst die zweite Inversion mit etwa 0.3 K niedrigeren Temperaturwerten als die GRAW-Sonden. Die DFM06 Radiosonde erreicht bis in eine Höhe von 14 km eine mittlere Abweichung von -0.11 K (Abb. 3.28, links) und zeigt damit eine gute Temperaturmessung der Atmosphäre im Vergleich zur Referenzsonde. Die Abweichungen liegen dabei meist innerhalb der Standardabweichung der Referenz und der Sensorgenauigkeit.

Das Profil der relativen Feuchte zeigt einige markante Unterschiede zwischen den GRAW-Sonden und der Vaisala RS92 (Abb. 3.27, rechts). Bis etwa 3.5 km Höhe misst die Vaisala Sonde ein Feuchteprofil mit Werten größer als 95 % relative Feuchte mit einer deutlichen Strukturierung. Die Fallsonden lösen die Strukturen nicht auf, sondern messen einen nur einen Feuchteabnahme mit der Höhe in diesem Bereich. Die Abweichungen nehmen von etwa 1 % relative Feuchte bis zu 8 % relative Feuchte zu. Es kann sein, dass die Feuchtesensoren durch den fallenden Niederschlag und den Durchflug der Wolken benetzt oder bereift wurden, denn die Fallsonden flogen wie vom Hersteller vorgesehen ohne Schutzkappe des Feuchtesensors. Die DFM06 Radiosonde misst in etwa den Verlauf der Strukturen der Vaisala Sonde, aber bei einem geringeren Feuchtwert (5 % bis 8 % relative Feuchte weniger, Abb. 3.28, rechts). Die Messdaten der GRAW-Sonden erscheinen im Vergleich zur Vaisala RS92 bei gleicher Zeitaufösung der Profildaten glatter. Ab etwa 3.5 km Höhe messen alle Sonden eine starke Feuchteabnahme von über 90 % relative Feuchte auf Werte von 32 % (Vaisala RS92), 42 % (Fallsonde Nr. 910803), 44 % (Fallson-

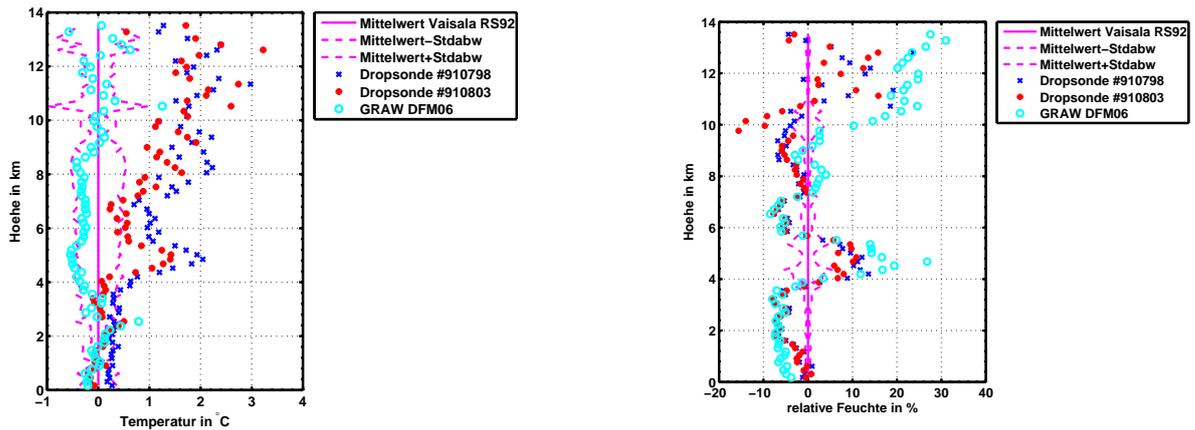


Abb. 3.28: Links: Abweichung der Temperaturmittelwerte von der Referenz Vaisala RS92. Rechts: Abweichung der Mittelwerte der relativen Feuchte von der Referenz.

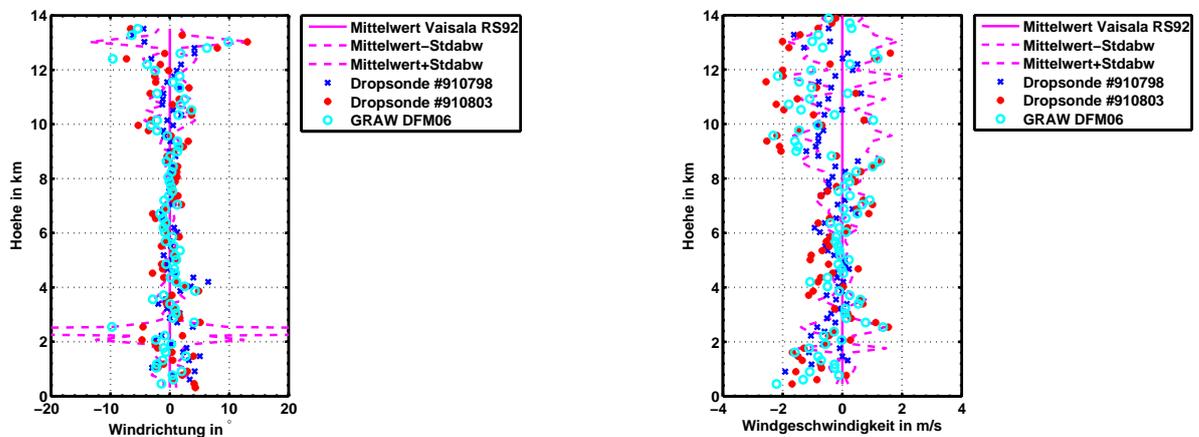


Abb. 3.29: Links: Abweichung der Mittelwerte der Windrichtung von der Referenz. Rechts: Abweichung der Mittelwerte der Windgeschwindigkeit von der Referenz.

de Nr. 910798) und 48 % relative Feuchte, wobei die DFM06 Radiosonde in diesem Bereich die größte Abweichung von knapp +16 % relative Feuchte gegenüber der Vaisala Sonde aufweist. Im weiteren Verlauf wird zwischen 5.8 km und 7 km Höhe eine Feuchtestruktur von den GRAW-Sonden überhaupt nicht gemessen. Diese Sonden zeigen wie schon in Bodennähe nur eine kontinuierliche Feuchteabnahme. Oberhalb von 7 km entspricht der Feuchteverlauf der Fallsonden in etwa dem der Vaisala Sonde, jedoch bei niedrigeren Absolutwerten. Die DFM06 Radiosonde löst die Temperaturstrukturen in diesem Höhenbereich nicht auf und misst eine kontinuierliche Abnahme der Feuchte mit der Höhe. In etwa 10 km Höhe misst die Referenzsonde eine schnelle Feuchteabnahme von etwa 50 % relative Feuchte bis auf Werte kleiner als 10 % relative Feuchte in 11 km Höhe. Die Fallsonden messen die Feuchteabnahme ähnlich schnell wie die Referenzsonde, erreichen aber nicht die niedrigen Feuchtwerte der Vaisala Sonde. Die Feuchtemessung der Fallsonden beginnt stark zu streuen. Die Sonden messen um bis zu +23 % relative Feuchte höhere Werte. Die DFM06 Radiosonde misst oberhalb von 10 km Höhe einen langsameren

Feuchteabnahme mit deutlich höheren Absolutwerten bis 14 km Höhe. Die maximale Abweichung von der Referenz beträgt in 13.5 km Höhe knapp über 30 % relative Feuchte.

Die aus den GPS-Daten abgeleiteten Größen Windrichtung und Windgeschwindigkeit zeigen geringe Abweichungen zur Vaisala Referenz (Abb. 3.29). Bei beiden Größen liegen die Abweichungen meist innerhalb der Standardabweichung der Referenz. Die Windgeschwindigkeit streut um den Mittelwert mit maximal  $\pm 2.5 \text{ ms}^{-1}$ . Im Mittel sind die Abweichungen von der Referenz immer  $< 0.5 \text{ ms}^{-1}$  (Fallsonde Nr. 910798:  $-0.45 \text{ ms}^{-1}$ , Fallsonde Nr. 910803:  $-0.49 \text{ ms}^{-1}$ , DFM06 Radiosonde:  $-0.33 \text{ ms}^{-1}$ ). Die Windrichtung wird ebenfalls sehr gut wiedergegeben. Die mittleren Abweichungen der GRAW-Sonden von der Referenzsonde sind deutlich kleiner als  $1^\circ$ . Die DFM06 Radiosonde erreicht eine mittlere Abweichung der Windrichtung von  $+0.29^\circ$  über die gesamte Höhe, die Fallsonde Nr. 910803 weicht im Mittel  $+0.53^\circ$  von der Referenz ab, die Fallsonde Nr. 910803 hat eine mittlere Abweichung von  $+0.40^\circ$ . Die starke Zunahme der Standardabweichung der Vaisala Sonde in 2.3 km Höhe im Bereich der Temperaturinversion wird durch eine starke Winddrehung um fast  $180^\circ$  von etwa  $20^\circ$  auf  $195^\circ$  erzeugt (nicht gezeigt). Die geringen Abweichungen der Windrichtung und Windgeschwindigkeit von der Referenz bestätigen eine gute Funktion des GPS-Moduls der Fallsonde.

Die Fehlerraten durch Übertragungsfehler und Datenausfall waren beim Aufstieg gering und der Empfang war während des Aufstiegs stabil (Tab. 3.15). Die doch beträchtliche Datenlücke in den Positionsda-

Tab. 3.15: Übersicht der Übertragungsfehler in Prozent aus den Profildaten für den ersten Aufstieg am 01.12.2009, 12 UTC.

Variable	Nr. 910798	Nr. 910803	DFM06	Vaisala RS92
Temperatur	0.0	0.0	0.0	0.0
Relative Feuchte	0.0	0.0	0.0	0.0
Windrichtung	4.82	0.0	0.0	0.0
Windgeschwindigkeit	4.82	0.0	0.0	0.0
Position Länge	32.90	0.0	0.0	0.0
Position Breite	32.90	0.0	0.0	0.0
Position Höhe	0.0	0.0	0.0	0.0

ten der Fallsonde Nr. 910798 ist dem Verlust des GPS-Signals durch die Reinitialisierung und Änderung der Funkfrequenz geschuldet. Anzumerken ist, dass die Positionsdaten erst nach 12.5 Minuten Flugzeit in den Profildaten auftauchen, während der Empfänger das GPS-Signal schon etwa 2.5 Minuten nach dem Start stabil anzeigt und aktualisiert. Im Vergleich dazu werden schon zwei Minuten nach dem Start erste Windwerte in den Profildaten abgelegt, die den Winddaten der anderen Sonden entsprechen. Die Beobachtung am Empfänger zeigte ein genau umgekehrtes Verhalten. Erst nach einem stabilen GPS-Signal wurden Winddaten angezeigt. Dadurch ergibt sich die große Differenz der Fehlerraten zwischen Wind- und Positionsdaten. Die vorliegenden Profildaten bis 14 km Höhe der anderen Sonden enthalten

keine Fehler. Die Übertragung und Decodierung der SONDENSIGNALE war bis in eine Höhe von 14 km problemlos möglich.

Der Fall aus 35 km Höhe wird hier nicht ausgewertet. Der Empfang wurde zunehmend schlechter und brach während des Falls ab. Lückenhafte Profildaten liegen bis nur etwa 10 km Höhe vor. Die beobachteten Temperaturen der Fallsonden und der Vaisala Sonde liegen während des Falls deutlich näher beieinander wie noch beim Aufstieg (nicht gezeigt). Aufgrund dieser Beobachtung wurde die Sondenposition für die nachfolgenden Flüge geändert.

### 3.3.2 Zweiter Aufstieg, 01.12.2009, 18 UTC

Die Startbedingungen entsprachen am Startplatz mit einer Temperatur von 5,9 °C und 96 % relative Feuchte bei bedecktem Himmel (8/8) und leichtem Niederschlag in etwa den Bedingungen des ersten Aufstiegs um 12 UTC. Für diese Messung mit der neuen Sensorposition wurde am Feuchtesensor der Fallsonde die Schutzkappe einer DFM06 Radiosonde angebracht um ein Benetzen des Feuchtesensors durch den fallenden Niesel während der Startzeit zu verhindern. Normalerweise ist diese Kappe für den Feuchtesensor der Fallsonde nur als Transportschutz gedacht. Gestartet wurden eine Vaisala RS92 und nur eine Fallsonde (Nr. 910782). Der Ballonplatzpunkt wurde in ca. 25 km Höhe erreicht.

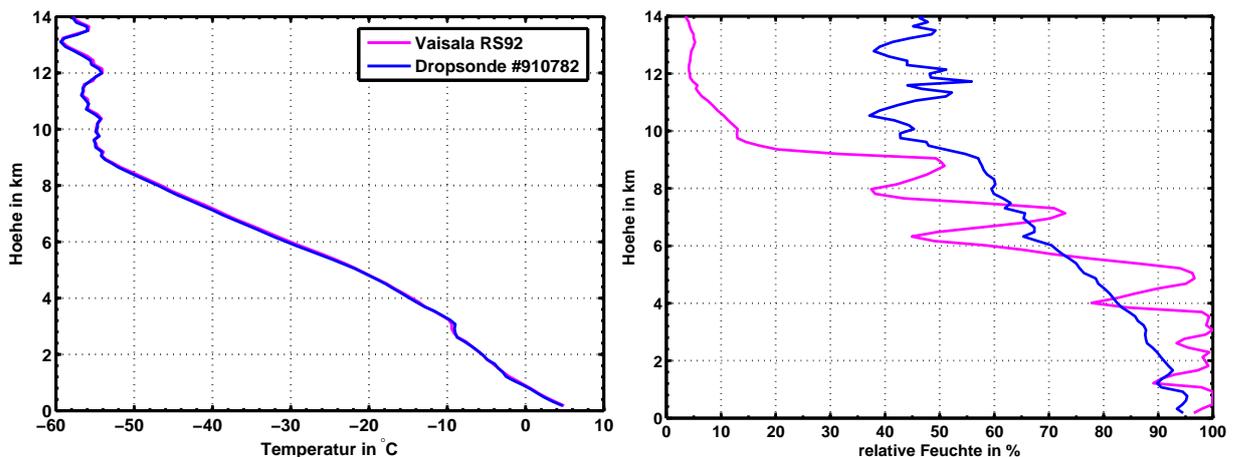


Abb. 3.30: Links: Temperaturprofil des zweiten Aufstiegs am 01.12.2009, 18 UTC, bis 14 km Höhe. Rechts: Profil der relativen Feuchte

Im Vergleich zum ersten Aufstieg sind die Temperaturmesswerte beider Sonden nahezu identisch, aber es treten große Unterschiede in Feuchteprofil auf (Abb. 3.30). Das Temperaturprofil beider Sonden zeigt in Verlauf und Messwert eine gute Übereinstimmung, die mittlere Abweichung der Fallsonde von der Referenz beträgt  $-0.19$  °C bis in 14 km Höhe (Abb. 3.31, links). Die Inversion in 3.2 km Höhe misst die Referenzsonde mit leicht tieferen Temperaturen. Teilweise sind die Abweichungen von der Referenz kleiner als 0.2 K und zeigen so eine gute Temperaturmessung der neuen Fallsonde. Ab dem Start misst die Fallsonde meist tiefere Temperaturen als die Referenzsonde. In der unteren Atmosphäre könnte die Verdunstungskühlung den größeren Sensor der Fallsonde mehr beeinflussen als den dünnen Sensor der

Vaisala Sonde. Die Temperaturstrukturen oberhalb von 9 km Höhe lösen beide Sonden gleich gut auf, die Fallsonde misst im Vergleich zur Vaisala Sonde leicht niedrigere Temperaturen (Abweichung kleiner als 0.4 K).

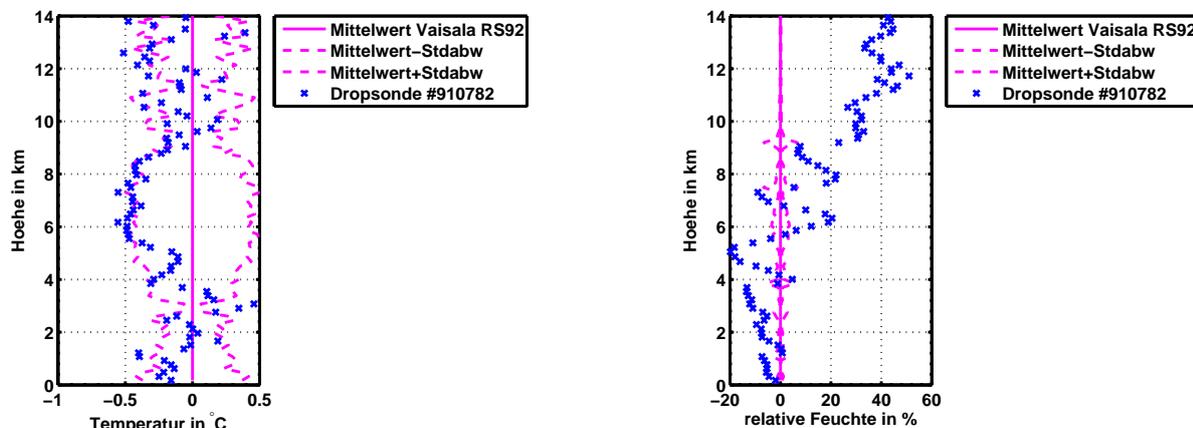


Abb. 3.31: Links: Abweichung der Temperaturmittelwerte von der Referenz Vaisala RS92. Rechts: Abweichung der Mittelwerte der relativen Feuchte von der Referenz

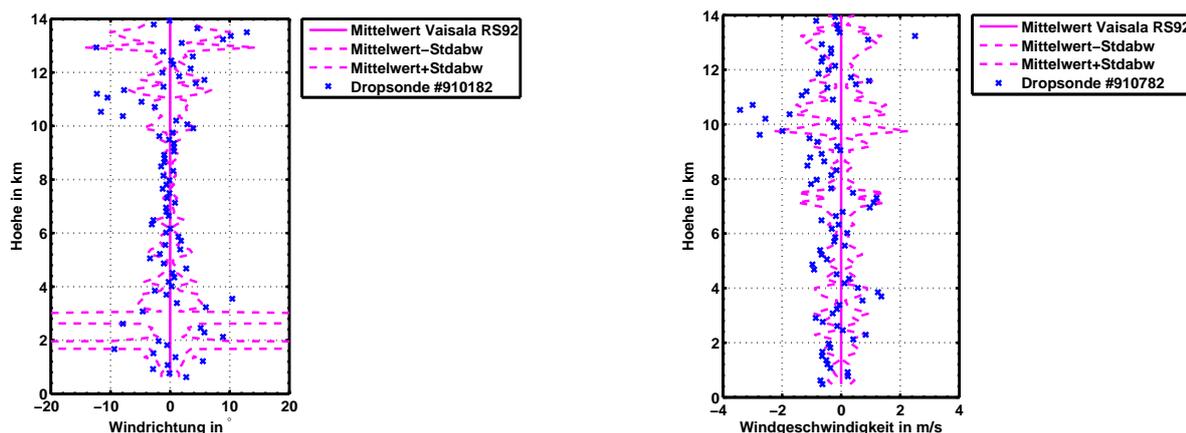


Abb. 3.32: Links: Abweichung der gemittelten Windrichtung von der Referenz. Rechts: Abweichung der Windgeschwindigkeit von der Referenz.

Die Profile der relativen Feuchte der Vaisala RS92 und der Fallsonde sind sehr unterschiedlich im Verlauf und Absolutwert (Abb. 3.31, rechts). Während die Referenzsonde ein stark strukturiertes Feuchteprofil misst, deutet die Fallsonde Feuchteänderungen nur schwach an und misst eine konstante Feuchteabnahme mit zunehmender Höhe. In Höhenbereichen, in denen die Referenzsonde eine schnelle Feuchteabnahme misst, reagiert die Fallsonde nicht oder nur sehr schwach (Feuchtestrukturen in 0.7 km, 1.2 km, 3.2 km, 4.6 km, 6.3 km und 7.8 km Höhe, Abb. 3.31 rechts). Ab 7.5 km Höhe treten große Abweichungen von bis zu 20 % relative Feuchte im Absolutwert auf. Bis 14 km Höhe nehmen die Abweichungen auf über 40 % relative Feuchte zu. Die Referenzmessung misst ab etwa 8 km Höhe eine schnelle Feuchteabnahme bis auf Werte <5 % relative Feuchte in 12 km Höhe. Die Fallsonde zeigt in der gleiche Höhe auch eine Feuchteabnahme an, doch ab 10 km Höhe ist das Feuchtesignal nicht stabil wie der Verlauf

der Referenz, sondern streut sehr stark um einen in dieser Höhe unrealistischen Absolutwert von 50 % relative Feuchte. Diese großen Abweichungen während des Aufstiegs könnte durch die Verwendung der Schutzkappe erklärt werden. Es kann sein, dass die Schutzkappe beim Aufstieg durch Niederschlag und Wolken Wasser einsammelt, das erst in größeren Höhen verdunstet. Die Schutzkappe behindert auch die Anströmung des Feuchtesensors. Die Belüftung des Sensors könnte durch die Schutzkappe so stark beeinträchtigt gewesen sein, dass der Austausch mit der Umgebungsluft fast schon unterbunden war und deshalb nur träge auf Veränderungen reagiert. Eine weitere Möglichkeit könnte ein Benetzten oder Bereifen des Sensors trotz Schutzkappe sein, weswegen der Sensor nur träge auf die Feuchteänderungen während des Aufstiegs reagiert, da der Belag auf dem Feuchtesensor erst verdunsten muss. Die Vaisala Sonde zeigt mit ihrem beheizten Feuchtesensor deutlich mehrere Höhenbereiche mit einer relativen Feuchte von 100 % bis etwa 4 km, die auf einen Wolkendurchflug zurückzuführen sind (Abb. 3.31, rechts). Es ist kaum vorstellbar, dass während des Aufstiegs soviel Wasser oder Eis aufgesammelt wurde, dass die relative Feuchte in etwa konstant bei 50 % relative Feuchte bis zur Maximalhöhe in 25 km bleiben kann, während die Referenzsonde die Umgebung mit Werten kleiner als 5 % relative Feuchte misst.

Die GPS-Daten wurden während des Aufstiegs zuverlässig übertragen und decodiert. Die aus den GPS-Daten abgeleiteten Größen Windrichtung und Windgeschwindigkeit erreichen eine gute Übereinstimmung mit der Referenz mit geringen Abweichungen (Abb. 3.32). Die Windrichtung hat im Mittel über das Profil eine Abweichung von  $0.52^\circ$  von der Referenz. Zwischen 5 km und 10 km Höhe sind die Abweichungen minimal. Zwischen 2 km und 4 km Höhe und über 10 km Höhe sind die Abweichungen von der Referenz mit  $\pm 12^\circ$  maximal. Die große Standardabweichung der Referenz zwischen 2 km und 4 km Höhe wird durch einen starken Windrichtungswechsel von nördlichen Richtungen auf südliche Richtungen verursacht, ähnlich wie im ersten Aufstieg (Abb. 3.32, rechts). Die mittlere Abweichung der Windgeschwindigkeit bis 14 km Höhe beträgt  $-0.33 \text{ ms}^{-1}$  und erreicht damit eine gute Übereinstimmung mit der Vaisala Sonde (Abb. 3.32, rechts). Die Streuung der Windgeschwindigkeit um den Mittelwert der Referenzsonde beträgt maximal  $\pm 3.4 \text{ ms}^{-1}$ . In 10 km Höhe findet man die größten (negativen) Abweichungen von bis zu  $-3.4 \text{ ms}^{-1}$ . Die Fallsonde misst in diesem Bereich eine stärkere Abschwächung der Windgeschwindigkeit von  $35 \text{ ms}^{-1}$  auf unter  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Gleichermaßen treten man in diesem Bereich die größten Abweichungen der Windrichtung von bis zu  $-12^\circ$  auf.

Bei diesem Aufstieg funktionierte der Empfang und die Decodierung der Daten fehlerfrei und bestätigte die gute Funktionsfähigkeit des Empfängersystems während des Aufstiegs bis 14 km Höhe.

Der Fall aus 25 km Höhe wird nicht ausgewertet, da die Profildaten große Datenlücken zwischen 4 km und 13 km Höhe bei Temperatur- und Feuchtwerten enthalten. Die GPS-Daten sind während des gesamten Falls nicht mehr verfügbar.

### 3.3.3 Dritter Aufstieg, 02.12.2009, 00 UTC

Der Aufstieg um 00 UTC wurde als Nachstart zur offiziellen Messung mit vier Sonden (RS92, DFM06 und zwei Fallsonden) durchgeführt. Die Wetterentwicklung seit 18 UTC zeigte einen kontinuierlichen Anstieg des Bodendrucks. Die Bewölkung löste sich bis auf eine dünne Wolkendecke in 3 km bis 4 km Höhe auf und es fiel kein Niederschlag mehr. Gestartet wurde bei den Bodenwerten am Startplatz mit einer Temperatur von 3.4 °C und 95 % relative Feuchte bei einem bedeckten Himmel (8/8). Aufgrund der niederschlagsfreien Bedingungen am Startplatz flogen die DFM06 Radiosonde und die Fallsonden ohne die Schutzkappe für den Feuchtesensor. Das Gespann stieg bis auf eine Höhe von 23.3 km.

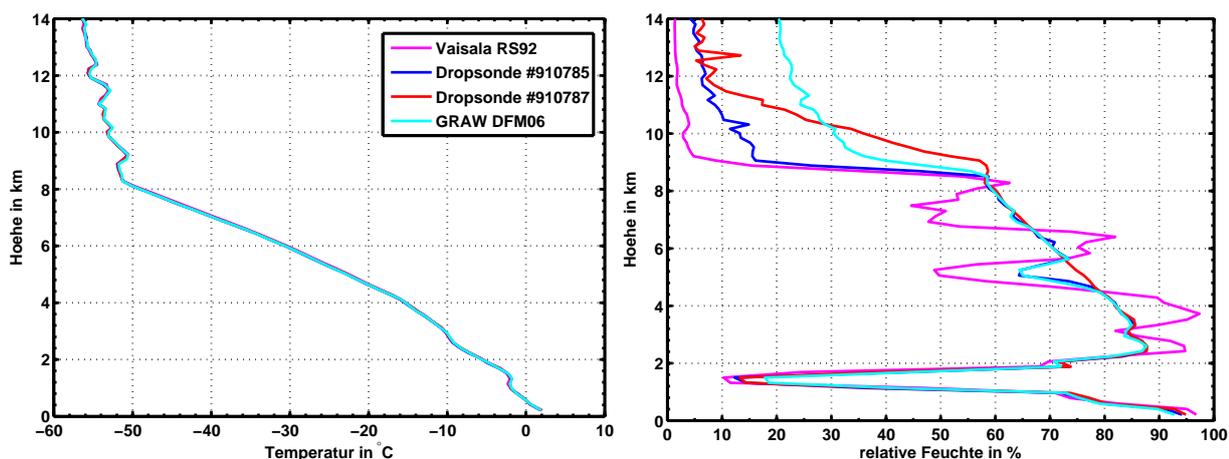


Abb. 3.33: Links: Temperaturprofil des dritten Aufstiegs am 02.12.2009, 00 UTC, bis 14 km Höhe. Rechts: Profil der relativen Feuchte

Der Nachtaufstieg zeigte die beste Temperaturübereinstimmung über das gesamte Profil aller Vergleichsmessungen. Die mittlere Abweichungen von der Referenzsonde über das gesamte Profil sind für alle Sonden kleiner als 0.1 K (Abb. 3.33, links). Die maximale Abweichung von der Referenz von allen GRAW-Sonden beträgt ca.  $\pm 0.5$  °C (Abb. 3.34). Die Inversion zwischen 1 km und 1.5 km Höhe lösen alle Temperatursensoren sehr gut auf, die Referenzsonde misst in diesem Bereich eine um etwa 0.2 K niedrigere Temperatur. Oberhalb der Wolke in 4 km Höhe messen die GRAW-Sonden eine niedrigere Temperatur, die auf verdunstendes Wasser oder sublimieren von Eis am Temperatursensor schließen lässt. Die größten negativen Abweichungen zeigen die GRAW-Sonden in etwa 7.5 km Höhe mit bis zu -0.5 K. Zwischen 8 km und 14 km Höhe wird das Temperaturprofil von allen Sonden gut wiedergegeben, die Abweichungen von der Referenz sind geringer als nach dem Wolkendurchflug ( $< 0.3$  K).

Die Feuchtemessungen der GRAW-Sonden zeigen bis etwa 2.5 km Höhe den gleichen Verlauf wie die Referenzsonde, oberhalb davon reagieren die Fallsonden träger und es kommt zu größeren Unterschieden im Feuchtwert und Verlauf (Abb. 3.33, rechts). Alle Sonden messen zwischen 1 und 1.8 km Höhe einen Bereich mit geringen Werten bis unter 10 % relative Feuchte (Vaisala RS92 und Fallsonde Nr. 910785). Der Feuchteanstieg auf Werte über 80 Bis 2.5 km Höhe beträgt die mittlere Abweichung der Fallsonde Nr. 910785 +0.17 % relative Feuchte im Vergleich zur Vaisala RS92, der Fallsonde Nr.

910787 +0.51 % relative Feuchte und der DFM06 +0.76 % relative Feuchte. Diese geringen Abweichungen bei sich schnell ändernder Feuchte über einen großen Wertebereich zeigen die Leistungsfähigkeit des Feuchtesensors der Fallsonden (Abb. 3.34, rechts). Die gute Feuchtemessung der GRAW-Sonden kann aber nicht auf die Messungen oberhalb von 2.5 km Höhe übertragen werden. Die Feuchtestruktur-

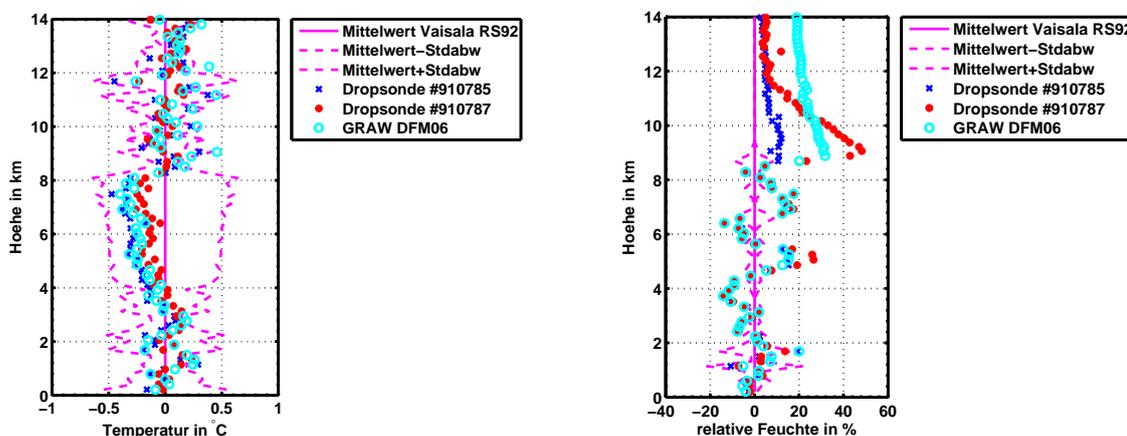


Abb. 3.34: Links: Abweichung der Temperaturmittelwerte von der Referenz Vaisala RS92. Rechts: Abweichung der relativen Feuchte von der Referenz.

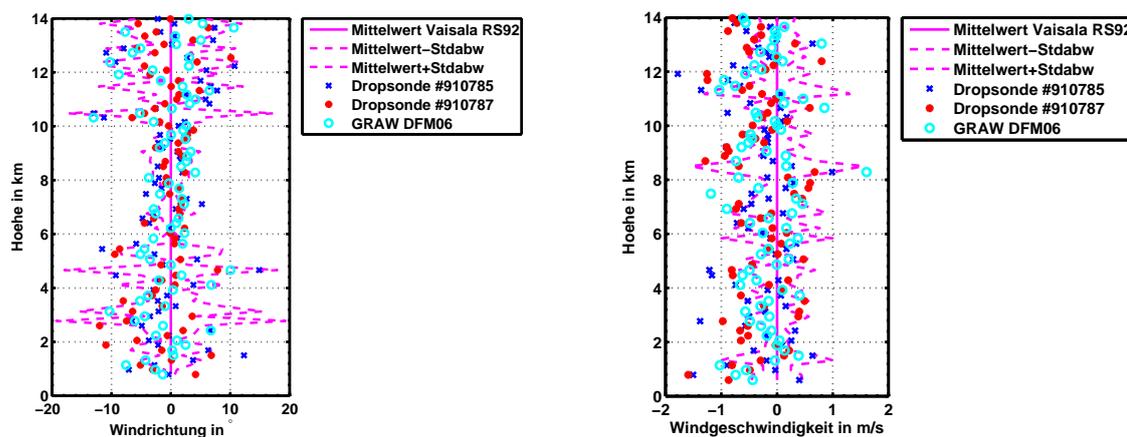


Abb. 3.35: Links: Abweichung der Windrichtung von der Referenz Vaisala RS92. Rechts: Abweichung der Windgeschwindigkeit von der Referenz.

ren zwischen 2.5 km und 8.5 km werden ähnlich wie beim zweiten Aufstieg nur schwach oder gar nicht von den GRAW-Sonden gemessen. In diesem Bereich werden Wolken durchflogen. Alle GRAW-Sonden erfahren beim Durchflug ein Benetzen oder Bereifen des Feuchtesensors und reagieren deshalb träge und nur schwach auf große Feuchteänderungen. Die Referenzsonde misst mit ihrem beheizbaren Feuchtesensor oberhalb der Wolke zuverlässige Feuchtwerte, während bei den GRAW-Sonden der Belag auf dem Feuchtesensor erst verdunsten muss. Letzteres zeigt sich im Höhenbereich zwischen 4.5 km und 5.5 km, sowie zwischen 6.5 km und 8 km oberhalb der Wolken (Abb. 3.34, rechts). Die Fallsonde Nr. 910787 misst anstatt einer Feuchteabnahme und Feuchtezunahme eine langsame kontinuierliche Abnahme der

relativen Feuchte und registriert den Feuchterückgang ab 8.5 km Höhe erst in 9 km Höhe. Dadurch ergeben sich Abweichungen im Feuchtwert von bis zu 48 % relative Feuchte (Abb. 3.34, rechts). Die Fallsonde Nr. 910785 und die DFM06 Radiosonde zeigen zwischen 4.5 km und 5.5 km Höhe noch die Feuchteabnahme und Feuchtezunahme, messen aber einen bis zu 16 % relative Feuchte höheren Absolutwert. Zwischen 5.6 km und 6.5 km messen beide Sonden eine kontinuierliche Abnahme der relativen Feuchte mit der Höhe (Abb. 3.34, rechts). Beide Sonden geben nur schwach die von der Referenzsonde gemessene Feuchtestruktur wieder und zeigen zudem die starke Feuchteabnahme in einer etwas größeren Höhe als die Vaisala Sonde. Die Fallsonde Nr. 910785 misst die Feuchteabnahme ähnlich schnell wie die Referenzsonde und nähert sich im weiteren Verlauf langsam der Referenzsonde bis auf eine Differenz von 5 % relative Feuchte im Messwert an. Die Fallsonde Nr. 910787 misst oberhalb von 9 km Höhe einen erheblich langsameren Feuchterückgang, erst in 14 km Höhe entsprechen die Feuchtwerte in etwa den der Fallsonde Nr. 910785. Ein Grund für diesen langsameren Vorgang kann eine stärkere Beeinflussung durch den Belag am Feuchtesensor sein, der erst oberhalb von 9 km vollständig entfernt ist. Die DFM06 Radiosonde misst den Feuchterückgang ähnlich wie die Fallsonde Nr. 910785, misst aber höhere Feuchtwerte und zeigt Abweichungen bis zu 30 % relative Feuchte (Abb. 3.33, rechts). Die Messung nähert sich wie bei allen Sonden einem konstanten Feuchtwert an, der aber immer noch um bis zu 20 % relative Feuchte größer ist als der der Referenzsonde ( $<3$  % relative Feuchte) (Abb. 3.34, rechts). Die gemessenen Feuchtwerte der GRAW-Sonden streuen ab etwa 12.5 km bis zur Maximalhöhe in 23.3 km stark. Die Feuchtemessungen der GRAW-Sonden sind in diesem Höhenbereich daher nicht aussagekräftig. Die Abweichungen nehmen durch die großen Unterschiede der Messwerte ab 2.5 km bis zur maximalen Höhe um ein vielfaches zu. Die Fallsonde Nr. 910785 weicht im Mittel +3,42 % relative Feuchte (maximale Abweichung: +17 % relative Feuchte) von der Referenzsonde ab, die Fallsonde Nr. 910787 +7,36 % relative Feuchte (maximale Abweichung: +48 % relative Feuchte) und die DFM06 +13,85 % relative Feuchte (maximale Abweichung: +32 % relative Feuchte).

Die Winddaten werden aus den GPS-Daten mit geringen Abweichungen von der Referenz abgeleitet. Die mittlere Abweichung der Windrichtung ist bei allen GRAW-Sonden kleiner als  $0.3^\circ$ . Es zeigen sich aber geringe Unterschiede zwischen den Sonden. Die Fallsonde Nr. 910785 hat bis 14 km Höhe die geringste mittlere Abweichung von der Referenz mit vernachlässigbaren  $0.03^\circ$ . Die Fallsonde Nr. 910787 hat mit  $-0.25^\circ$  die größte mittlere Abweichung von der Referenz, die DFM06 Radiosonde weicht im Mittel  $0.12^\circ$  von der Referenz ab. Die maximale Differenz der GRAW-Sonden von der Referenz ist  $\pm 12^\circ$ . Diese geringen und vernachlässigbaren Abweichungen zeigen die gute Richtungsberechnung aus den Positionsdaten des GPS-Signals. Die Windgeschwindigkeit weicht im Mittel weniger als  $0.4 \text{ ms}^{-1}$  von der Referenz ab. Die maximalen Abweichungen liegen zwischen  $\pm 1.7 \text{ ms}^{-1}$ , meist aber innerhalb  $\pm 1.0 \text{ ms}^{-1}$  und erreichen somit eine gute Übereinstimmung mit der Referenz. Die maximalen Abweichungen der GRAW-Sonden in Windrichtung und Windgeschwindigkeit treten in den gleichen Höhenbereichen zwischen 2 km und 6 km Höhe und oberhalb von 10 km Höhe auf.

Die Messwerte von Temperatur und Feuchte wurden über den gesamten Höhenbereich ohne Fehler von allen Sonden übertragen, somit war das Funksignal ausreichend gut für die Messdaten der Sensoren. Die Übertragung der korrekten GPS-Daten war bis in eine Höhe von 14 km möglich. Es traten keine Ausfallwerte oder Decodierfehler in den Profildaten auf.

Während des Falls konnte die Fallsonde Nr. 910787 und die Vaisala RS92 Sonde bis etwa 800 m Höhe empfangen werden. Die Fallsonde Nr. 910787 sendete nur korrekte Temperatur- und Feuchtedaten, die GPS-Daten waren aufgrund eines Defekts des GPS-Chips fehlerhaft. Es wurde eine konstante Position und Höhe übertragen, was zu fehlerhaften Berechnungen der Windgeschwindigkeit und Windrichtung führte. Daher wurde nur das Fallprofil von Temperatur und relativer Feuchte mit der Vaisala RS92 verglichen. Die Fallsonde Nr. 910785 konnte nur beim Aufstieg empfangen werden. Der Empfang der Daten brach wie bei der Fallsonde Nr. 910803 während des ersten Aufstiegs ab. Die Wiederaufnahme des Datenempfangs dieser Sonde für den Fall misslang.

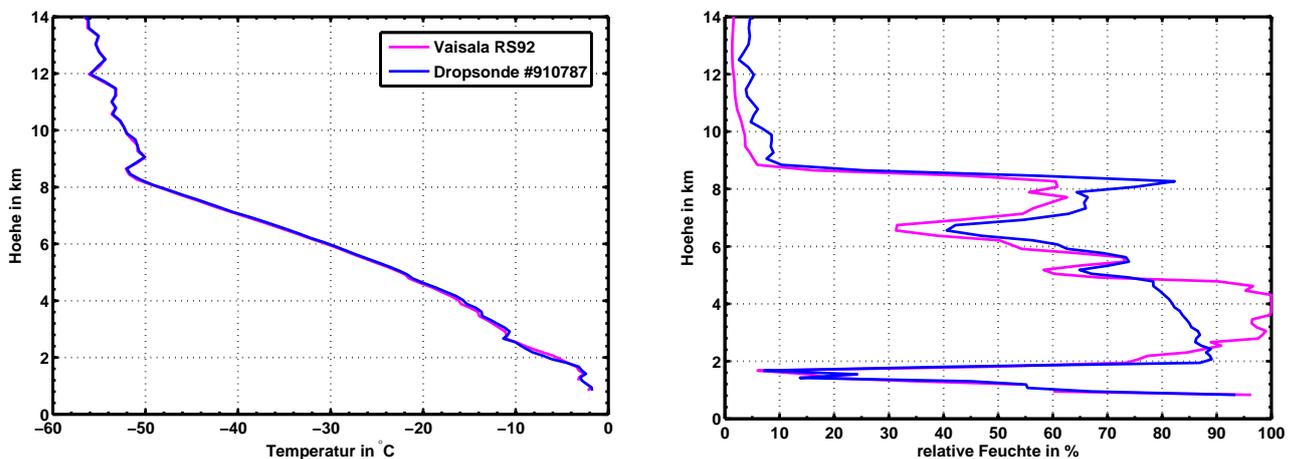


Abb. 3.36: Links: Fallprofil der Temperatur des dritten Aufstiegs am 02.12.2009, 00 UTC. Rechts: Fallprofil der relativen Feuchte.

Die fehlende Höheninformation für die Fallsonde Nr. 910787 wurde aus den Daten der Vaisala Sonde übernommen und angepasst. Da die Sonden zusammen an einer Stange befestigt waren, kann die Übernahme der Höheninformation ohne Fehler angenommen werden. Der Unterschied zwischen Aufstieg und Fall ist in den Profilen wegen der größeren Fallgeschwindigkeit in großen Höhen an der größeren Auflösung sichtbar (Abb. 3.36).

Die Temperaturprofile der Fallsonde Nr. 910787 und der Vaisala RS92 Sonde sind fast identisch. Die mittlere Abweichung der Fallsonde von der Referenz beträgt  $+0.11$  °C für das gesamte Fallprofil (Abb. 3.36, links). Zwischen 2 km und 2.5 km Höhe sind die gemessenen Temperaturen der Fallsonde etwa  $-1.1$  °C niedriger als die der Referenz. Grund dafür ist ein benetzter oder bereifter Temperatursensor nach dem Durchflug von Wolken in 4 km Höhe. Die Verdunstung von Wasser bzw. das Sublimieren von Eis führt zu einer Temperaturerniedrigung am Sensor (Wet-Bulb-Effekt) und entspricht somit nicht dem wahren Temperaturverlauf. Die Referenzsonde ist von diesem Effekt geringer betroffen, da der

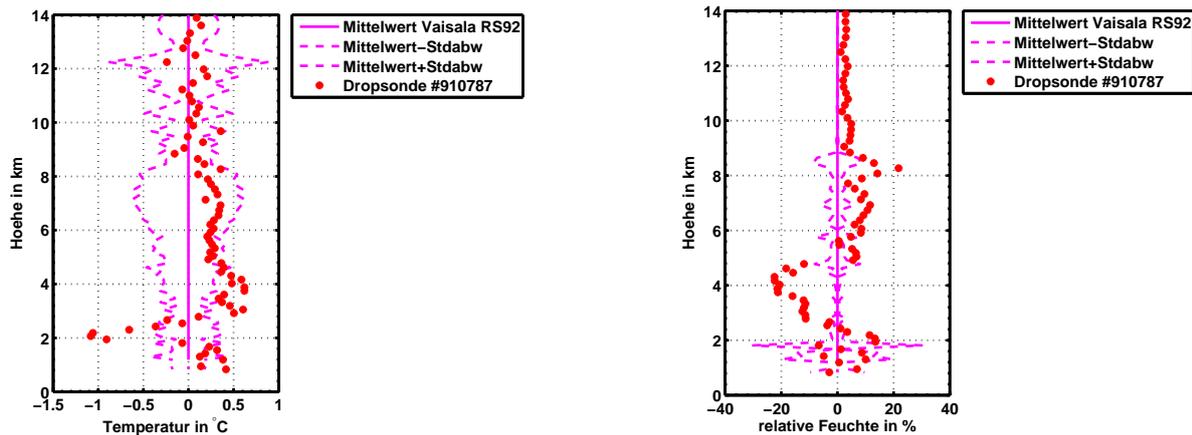


Abb. 3.37: Links: Abweichung der Temperaturmittelwerte von der Referenz Vaisala RS92. Rechts: Abweichung der Mittelwerte der relativen Feuchte von der Referenz.

Sensor der Vaisala Sonde kleiner und dünner ist als der Temperatursensor der Fallsonde. Die auftretenden Temperaturstrukturen, wie z.B. Inversionen, werden von beiden Sonden gleich gemessen.

Die Messwerte der relativen Feuchte zeigen über das gesamte Fallprofil eine bessere Übereinstimmung mit der Referenz als beim Aufstieg (Abb. 3.36, rechts). Unterhalb von 8.5 km Höhe steigt die Feuchte von Werten unter 10 % auf über 60 % relative Feuchte an. Die Fallsonde misst oberhalb der Wolkenschicht zwischen 5 km und 8.5 km höhere Feuchtwerte als die Referenz mit Abweichungen zwischen 10 % und 20 % relative Feuchte. Zwischen 2.5 km und 5 km Höhe zeigt der Feuchtesensor ein ähnliches Verhalten bei einem Wolkendurchflug wie bei den früheren Aufstiegen. Durch Bereifen oder Benetzen des Sensors reagiert der Sensor träger und misst innerhalb der Wolke nur einen langsamen kontinuierlichen Anstieg der relativen Feuchte von etwa 80 % bis 90 % relative Feuchte, während die Vaisala Sonde Bereiche mit 100 % relative Feuchte misst. Direkt unterhalb der Wolke misst die Fallsonde in dem Höhenbereich zwischen 2 km und 2.5 km Höhe höhere Feuchtwerte als die Referenzsonde. In diesem Bereich ist der Feuchtesensor noch bereift oder benetzt und der Belag verdunstet bzw. sublimiert in der trockeneren Umgebungsluft. Dieser Effekt ist bei der Vaisala Sonde kaum oder nicht zu sehen, da der Feuchtesensor der RS92 beheizbar ist, um einen Belag von Wasser oder Eis auf dem Sensor zu verhindern (zwei kapazitive Feuchtesensoren, im Wechsel geschaltet). Bemerkenswert ist der Höhenbereich zwischen 1 km und 1.8 km unterhalb der Wolke. Die Feuchtestruktur mit einer schnellen Abnahme auf Werte unter 10 % relative Feuchte und der Anstieg auf Werte über 90 % relative Feuchte wird von beiden Sonden gleich gut gemessen.

Die Fehlerraten der Fallsonde Nr. 910787 sind vor allem geprägt durch den Ausfall der GPS-Daten. Der Empfang der Sonde wurde mit zunehmender Entfernung schlechter, sodass in den Rohdaten einzelne Werte fehlen oder falsch decodiert wurden. In den Profildaten liegen keine fehlerhaften Werte oder Ausfallwerte der Temperatur und relativen Feuchte vor.

Tab. 3.16: Übersicht der Übertragungsfehler in Prozent aus den Fallprofildaten des dritten Aufstiegs am 02.12.2009, 00 UTC.

Variable	Nr. 910787	Vaisala RS92
Temperatur	0.0	0.84
Relative Feuchte	0.0	0.84
Windrichtung	100	0.0
Windgeschwindigkeit	100	0.0
Position Länge	100	0.0
Position Breite	100	0.0
Position Höhe	100	0.0

### 3.3.4 Vierter Aufstieg 02.12.2009, 12 UTC

Der vierte Aufstieg um 12 UTC wurde mit zwei Fallsonden, einer DFM06 Radiosonde und einer Vaisala RS92 bei einer Temperatur von 1.1 °C, 91 % relative Feuchte bei geringer Bewölkung (1/8) und Sonnenschein am Startplatz gestartet. Die Sonden erreichten eine Höhe von knapp über 22 km.

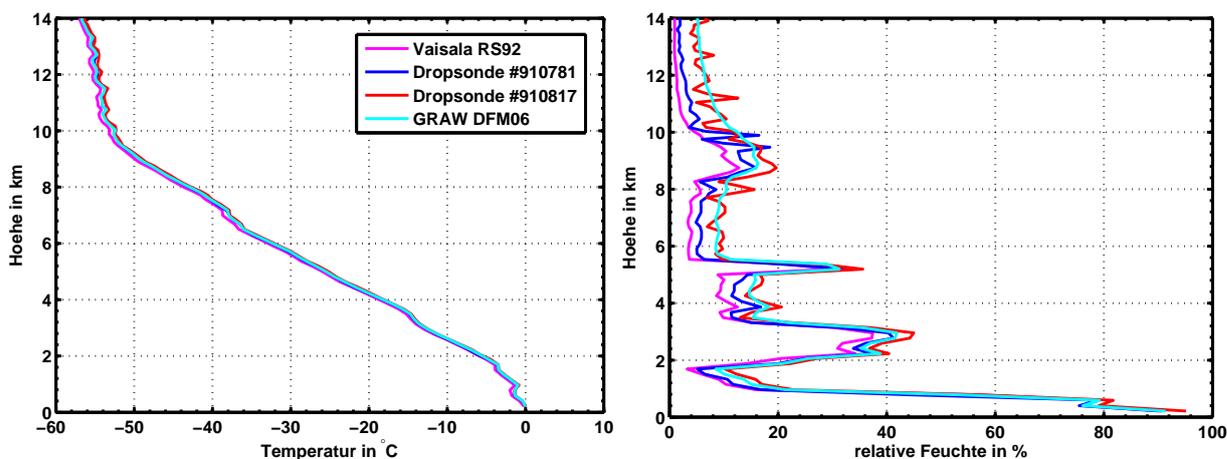


Abb. 3.38: Links: Temperaturprofil des vierten Aufstiegs am 02.12.2009, 12 UTC, bis 14 km Höhe. Rechts: Profil der relativen Feuchte

Das Temperaturprofil wird im Vergleich zur Referenzsonde von allen GRAW-Sonden sehr gut wiedergegeben (Abb. 3.38, links). Die GRAW-Sonden messen während des gesamten Aufstiegs leicht höhere Temperaturen als die Referenzsonde. Die mittleren Abweichungen von der Referenz über das Profil bis 14 km Höhe sind für alle GRAW-Sonden kleiner als 1 K (Abb. 3.39, links). Die Fallsonde Nr. 910781 und die DFM06 Radiosonde messen im Mittel eine um 0.5 K höhere Temperatur als die Referenz. Die Fallsonde Nr. 910817 weicht im Mittel um 0.75 K von der Referenz ab. Die geringsten Abweichungen von der Referenz treten in Bodennähe auf mit Abweichungen kleiner als 0.5 K von der Referenz. Mit zunehmender Höhe nehmen die Abweichungen aller GRAW-Sonden zu. Die Fallsonde Nr. 910817 hat

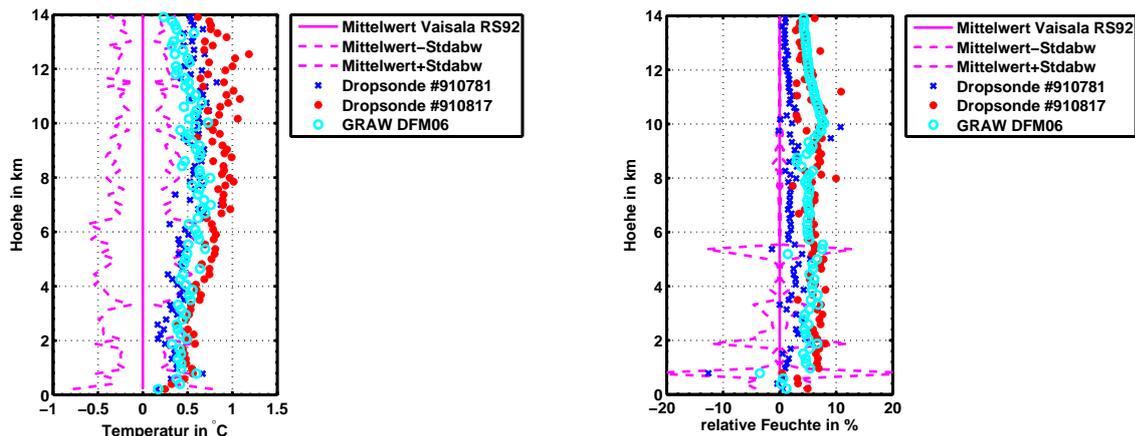


Abb. 3.39: Links: Abweichung der Temperaturmittelwerte von der Referenz Vaisala RS92. Rechts: Abweichung der relativen Feuchte von der Referenz.

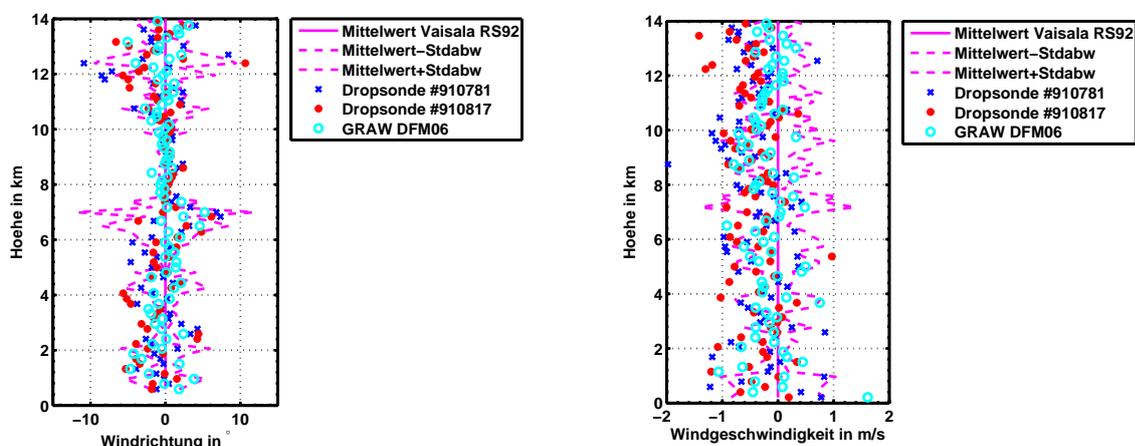


Abb. 3.40: Links: Abweichung der Windrichtung von der Referenz Vaisala RS92. Rechts: Abweichung der Windgeschwindigkeit von der Referenz.

eine maximale Abweichung von der Referenz von 1.2 K in 13 km Höhe, die Fallsonde Nr. 910781 und die DFM06 Radiosonde weichen um maximal 0.8 K von der Referenz ab. Bei dieser Messung muss der Strahlungsfehler mit bis zu +0.5 K als Fehlerquelle mit beachtet werden (Nash et al., 2006). Die Vaisala RS92 kann durch ihren kleineren und dünneren Temperatursensor weniger von diesem Strahlungsfehler beeinträchtigt sein (CIMO Guide - Chapter 12, Tab. 12.7). Zieht man den geschätzten Strahlungsfehler von 0.5 K ab, ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit der Referenzsonde mit fast identischen Messwerten.

Der vierte Aufstieg bei fast wolkenlosen Bedingungen zeigt die beste Messung des Feuchtesensors aller Vergleichsaufstiege (Abb. 3.38, rechts). Alle Feuchtestrukturen des Profils lösen die GRAW-Sonden identisch zur Referenzsonde auf. Die mittleren Abweichungen von der Referenz sind für alle GRAW-Sonden kleiner als 6 % relative Feuchte für den Aufstieg bis 14 km Höhe (Abb. 3.38, rechts). Die geringste mittlere Abweichung von der Referenz hatte die Fallsonde Nr. 910781 mit nur 1.9 % relative

Feuchte und erreicht damit eine sehr gute Messung sogar innerhalb der Sensorgenauigkeit. Ab 10 km Höhe ist die Abweichung im Absolutwert von der Referenz sogar kleiner als 0.5 % relative Feuchte. Die DFM06 Radiosonde weicht im Mittel 5.1 % relative Feuchte und die Fallsonde Nr. 910817 5.7 % relative Feuchte von der Referenzsonde ab. Beide Sonden zeigen den gleichen Verlauf des Feuchteprofils und messen aber einen höheren Feuchtwert. Die maximale Abweichung von der Referenz ist +11 % relative Feuchte, die vereinzelt in Bereichen in 8 km, 10 km und 11 km Höhe auftritt, in denen das Feuchtesignal der Fallsonden einer starken Schwankungen unterlag.

Die Leistungsfähigkeit des Feuchtesensors der Fallsonden wird mit dieser Profilmessung bestätigt. Die schnelle Feuchteabnahme kurz nach dem Start wird von allen Sonden sehr gut wiedergegeben (Abb. 3.38, rechts). Die Absolutwerte im Feuchteminimum weichen nur wenig voneinander ab (Abb. 3.39, rechts). Die weiteren Feuchtestrukturen werden während des Aufstiegs sehr gut wiedergegeben. Die Fallsonde Nr. 910817 misst ab 6 km Höhe das Feuchteprofil mit geringen Schwankungen der Messwerte, dies zeigt sich vor allem oberhalb von 10 km Höhe (Abb. 3.38, rechts). Die Abweichungen von der Referenz sind während des Aufstiegs fast konstant und bestätigen dem Feuchtesensor eine hohe Messgenauigkeit unter trockenen Bedingungen.

Die Ableitung der Windgrößen aus den GPS-Daten wird bei diesem Aufstieg sehr gut wiedergegeben. Die Abweichungen liegen meist im Bereich der Standardabweichung der Referenzsonde. Die mittleren Abweichungen von der Referenz sind für die Fallsonde Nr. 910781 und die DFM06 Radiosonde mit  $0.4^\circ$  sehr gering und vernachlässigbar. Die zweite Fallsonde Nr. 910817 weicht im Mittel  $1.6^\circ$  von der Referenz ab und zeigt im Vergleich zur anderen Fallsonde eine größere Streuung der berechneten Werte. Die maximale Streuung in der Windrichtung befindet sich oberhalb von 12 km Höhe mit  $\pm 10^\circ$ . Bis 12 km Höhe sind die Streuungen um den Referenzwert kleiner als  $5^\circ$ . Die Windgeschwindigkeit wird im Vergleich zur Referenz sehr gut wiedergegeben. Die mittlere Abweichung aller Sonden ist kleiner als  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ . Die DFM06 Radiosonde hat die kleinste mittlere Abweichung von der Referenz mit  $0.15 \text{ ms}^{-1}$ , beide Fallsonden weichen im Mittel etwa  $0.37 \text{ ms}^{-1}$  bzw.  $0.40 \text{ ms}^{-1}$  von der Referenz ab. Die maximale Abweichung ist bei dieser Messung  $\pm 1.5 \text{ ms}^{-1}$  in Bodennähe und oberhalb von 12 km Höhe und zeigt damit eine gute Übereinstimmung mit der Referenzsonde.

Übertragungsfehler oder fehlerhaft decodierte Werte sind in diesem Aufstieg bei allen Sonden nicht in den Profildaten zu finden.

Der Fall der Sonden wird hier nicht betrachtet, da der Empfang knapp unterhalb von 4 km Höhe abbrach und mehrere Datenlücken in den Fallsondendaten auftraten.

Die Vergleichsmessungen mit der Vaisala RS92 Radiosonde bestätigen der neuen Fallsonde eine sehr gute Temperaturmessung. Die Abweichungen von der Referenz sind gering und bis auf den ersten Aufstieg kleiner als 0.5 K. Die Ursache für die Temperaturunterschiede der Fallsonden im ersten Aufstieg konnte identifiziert und durch eine Änderung der Sensorposition behoben werden. Die Feuchtemessung zeigt große Probleme und Abweichungen von der Referenzsonde bei Niederschlag und Wolkendurchflü-

gen während des Aufstiegs oder Falls. Durch einen Belag von Wasser oder Eis auf dem Feuchtesensor der Fallsonde reagiert der Sensor nur noch träge und schwach auf Feuchteänderungen. Dies zeigte sich vor allem in den ersten drei Aufstiegen und dem Fallprofil um 00 UTC (Abb. 3.27, 3.30, 3.33 und 3.36, jeweils rechts). Die beste Feuchtemessung im vierten Aufstieg bei niederschlagsfreien und wolkenlosen Bedingungen zeigen die Leistungsfähigkeit und Messgenauigkeit des Feuchtesensors bei Feuchteänderungen. Bei den Fallsonden wurden allerdings Schwankungen im Feuchtesignal festgestellt, meist im Bereich oberhalb von 10 km Höhe in einer sehr trockenen Luft.

## 4 Testflüge mit Abwürfen der Sonden von Bord der Do-128

Mit dem Forschungsflugzeug Dornier Do-128 D-IBUF des Instituts für Flugführung (IFF) der Technischen Universität Braunschweig wurden Testabwürfe des Abwurfbehälters und der Fallsonden durchgeführt. Die Dornier Do 128 ist ein Hochdecker mit zwei Propellerturbinen und einem robusten, starren Fahrwerk. Das Flugzeug ist mit einer wissenschaftlichen Versuchsausrüstung für meteorologische Messungen in der unteren Atmosphäre sowie für Flugmechanik und Flugführungsexperimente ausgestattet. Es verfügt über einen Nasenmast zur Messung der meteorologischen Größen Temperatur, Feuchte und Wind. In der Kabine des Flugzeugs können weitere Instrumente für spezielle Messungen eingebaut werden. Die Dornier Do-128 wird vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung des KIT häufig bei Messkampagnen eingesetzt, zuletzt bei COPS im Jahr 2007. Für den Test der KITsonde wurde eine Empfangseinheit mit drei Helpert-Empfängern und einem WiNRADiO-Empfänger sowie ein GPS-Repeater in das Flugzeug eingebaut und zugelassen. Als Abwurfteinrichtung wurde der Abwurfschacht der Karlsruher Fallsonde modifiziert und mit einem Rohreinsatz als Führung für den zylindrischen Abwurfbehälter und einer 400 MHz-Außenantenne (Sensor Systems UHF S65-1217) ausgestattet.

### 4.1 Reichweitentest und Empfängerwahl

Ein Reichweitentest wurde mit zwei Flugzeugen durchgeführt, um die maximale Reichweite der Funkverbindung zu testen. Eine Fallsonde wurde dazu mit einer externen Batterie am Flügel eines privaten Kleinflugzeugs D-EKKY befestigt. Die Fallsonde wurde an einem Laptop mit der Empfangseinheit im Flugzeug der Do-128 initialisiert. In der Empfangsbox waren vier verschiedene Empfänger eingebaut. Drei verschiedene Ausführungen des Helpert-Empfängers (Helpert-15, HH180 ohne AFC und HH183 mit AFC), sowie ein WiNRADiO-Empfänger mit AFC den GRAW einsetzt, wurden getestet. Die Möglichkeiten des WiNRADiO-Empfängers konnten mit diesem Aufbau nicht voll genutzt werden. Dieser Empfänger kann Daten auch direkt digital an die Decodierungssoftware übergeben. Die WiNRADiO-Daten wurden jedoch in gleicher Weise wie die Daten der Helpert-Empfänger gespeichert. Durch die zusätzliche Analog-Digitalwandlung kann es daher zu einer Unterschätzung der Empfangsqualität bei den WiNRADiO-Daten kommen.

Beide Flugzeuge starteten kurz nacheinander und flogen in entgegengesetzte Richtungen in unterschiedlichen Höhen. Die Fallsonde am Flügel der D-EKKY flog in einer Höhe von etwa 3000 Fuß  $\approx$  914 m mit einer Geschwindigkeit von knapp  $50 \text{ ms}^{-1}$  und befand sich immer unterhalb der Do-128, die in einer Höhe von 9500 Fuß  $\approx$  2900 m mit einer Geschwindigkeit von  $65 \text{ ms}^{-1}$  flog. Der Datenempfang wurde mit zunehmender Entfernung bis zum vollständigen Abbruch beobachtet. Nach dem Empfangsab-

bruch wendeten beide Flugzeuge und flogen wieder aufeinander zu. Der Empfang der Sonde war bei abnehmender Entfernung schließlich wieder möglich und konnte bis zur Landung fortgesetzt werden (Tab. 4.1). Zur Auswertung wurden die Rohdaten der Sonde zu Sekundenmittelwerten zusammengefasst, da die GPS-Position nur einmal pro Sekunde aktualisiert und übertragen wird. Pro Empfänger ergibt sich so eine Empfangsdatei mit decodierten Sondendaten mit einer Zeitauflösung von einer Sekunde. In den decodierten Daten jedes Empfängertyps wurde die letzte GPS-Position eines stabilen GPS-Signals gesucht. Damit ist gemeint, dass nicht ein vereinzelter Positionswert umringt von nicht decodierten Daten oder fehlenden Daten für die Auswertung herangezogen wird, sondern der letzte GPS-Wert an einer längeren Reihe von aufeinander folgenden GPS-Daten. In den Sondendaten wurden die Werte für Temperatur und Feuchte noch etwas länger empfangen und decodiert, während die GPS-Daten nicht mehr decodiert werden. Die Sondersignale können bis zu einer Signalqualität von 0.75 vollständig und korrekt decodiert werden. Sinkt der Wert der Signalqualität unter 0.75, so kann es zu Datenausfällen kommen. Die GPS-Daten sind aufgrund ihrer größeren Länge fehleranfälliger als die Temperatur- und Feuchtedaten. Dies zeigte sich deutlich bei diesem Reichweitentest.

Die Fallsonde am Flügel der D-EKKY und die Empfangsantenne der D-IBUF bewegten sich bei zunehmender Entfernung mit etwa  $115 \text{ ms}^{-1}$  auseinander. Ab einer Entfernung von 177 km gelang die Decodierung des Sondersignals nicht mehr ohne größere Datenlücken. Die GPS-Daten wurden nur noch vereinzelt korrekt decodiert. Die Temperatur- und Feuchtedaten wurden noch etwa fünf Minuten nach dem Ausfall der GPS-Daten mit Datenlücken (bis zu 30 Sekunden) mit dem Empfänger HH180 bis zu einer geschätzten Entfernung von knapp 210 km empfangen.

Nach der Wende bewegten sich die Fallsonde und die Empfangsantenne mit  $115 \text{ ms}^{-1}$  aufeinander zu. Der Empfang von regelmäßigen Temperaturdaten war etwa 70 Sekunden vor dem erfolgreichen Empfang von GPS-Daten der Fallsonde möglich. Damit lässt sich die maximale Empfangsreichweite auf etwa 250 km abschätzen, allerdings mit einem unvollständigen Datensatz. Ein vollständiger Datensatz konnte ab einer Entfernung von ca. 245 km empfangen werden.

Bei einer geschätzten Flugzeuggeschwindigkeit von  $115 \text{ ms}^{-1}$  und einer angenommenen mittleren Fallgeschwindigkeit der Fallsonde von  $7 \text{ ms}^{-1}$  ergibt sich bei einem Abwurf aus 12 km eine Falldauer von knapp 30 Minuten für die Sondierung. In dieser Zeit würde das Flugzeug mit der Empfangsanlage etwa 210 km zurücklegen. Damit ist auf den ersten Blick der vollständige Empfang nicht gewährleistet. Bei einer kontinuierlichen Entfernung des Flugzeugs von der Sonde würde der Empfang geschätzt in etwa 3 km Höhe abbrechen. In diesem Fall müsste das Flugmuster auf die Empfangsreichweite oder die Fluggeschwindigkeit angepasst werden. Das Forschungsflugzeug HALO wird bis zu  $180 \text{ ms}^{-1}$  schnell fliegen.

Eine weitere Einschränkung der Empfangsreichweite kann bei Abwürfen in komplexem Gelände durch die Unterbrechung der Sichtverbindung erfolgen und damit wichtige bodennahe Messdaten verloren gehen. Poulos et al. (2006) zeigen, dass der Empfangsabbruch zur Sonde bei bekannten Variablen wie Fluggeschwindigkeit, Fallgeschwindigkeit der Sonde und Geländehöhen abgeschätzt werden kann.

Um einen Datenverlust in komplexem Gelände zu vermeiden, schlagen Poulos et al. (2006) vor, die Flugstrecke an das Gelände anzupassen oder zusätzliche Bodenstationen für den Datenempfang im Zielgebiet aufzustellen bzw. einen Signalverstärker für die Sonden in exponierter Lage aufzubauen. Bei einer guten Mobilfunkabdeckung im Zielgebiet und Geländezugänglichkeit wird der Einsatz eines Fallsondensystems nach Kottmeier et al. (2001) vorgeschlagen.

Die neue Fallsonde bietet die Möglichkeit, ein Satellitenmodem an die Fallsonde anzuschließen und die Sondendaten über eine Satellitenverbindung an einen Internetserver zu senden, sodass die Sonde auch unabhängig von Abstand und Empfangsbedingung zum Flugzeug ein vollständiges Fallprofil messen kann.

Der Reichweitentest zeigt, dass alle Empfänger in etwa gleich gut empfangen, die Abweichungen in der Empfangsreichweite sind gering und liegen innerhalb weniger Kilometer, siehe Tab. 4.1. Wenn

Tab. 4.1: Maximale Entfernung des Sondenempfangs im Flugzeug.

Empfängertyp	Entfernung zunehmend	Entfernung abnehmend	Differenz
Helpert 15	177.8 km	245.0 km	67.2 km
Helpert HH180	180.9 km	244.6 km	63.7 km
Helpert HH183	177.2 km	244.7 km	67.5 km
WiNRADiO	177.2 km	233.9 km	56.7 km

Sonde und Empfänger sich aufeinander zubewegen ist der Empfang in größerer Entfernung möglich, im Vergleich ist die Empfangsreichweite etwa 27 % größer beim Rückflug aufeinander zu als beim Flug voneinander weg. Eine mögliche Erklärung könnte eine Verdeckung der Sichtlinie zwischen Antenne und eingesetztem Rohreinsatz oder die Ausrichtung der Antenne zu den Signalen sein. Aufgrund der Ergebnisse des Reichweitentests wurde der Empfängertyp Helpert HH183 mit AFC für das Fallsondensystem ausgewählt. Eine Modifizierung des Empfängers erlaubt es, die AFC abzuschalten.

## 4.2 Testabwürfe des Abwurfbehälters

Im Jahr 2008 wurden erste Abwürfe mit Prototypen des Abwurfbehälters durchgeführt. Mit Abwürfen bei Überflügen über dem Flughafengelände des Forschungsflughafen Braunschweig in niedriger Höhe (150 m) wurde die Funktionsweise des Abwurfbehälters und verschiedene Fallschirmtypen getestet. Für diese Erprobungen waren die Abwurfbehälter mit Fallsondenattrappen beladen, um zu sehen, ob, wann und wie der Inhalt des Behälters freigegeben wird. Eine räumliche Separierung der Sonden konnte auf der kurzen Fallstrecke beobachtet werden. Die Abwürfe wurden fotografisch festgehalten, um erkennen zu können, ob der Brems- und Öffnungsmechanismus wie gewünscht und zuverlässig funktionierte. Aus den gewonnen Erkenntnissen entwickelte sich der jetzige Mechanismus mit zweistufiger Abbremsung durch Bremsklappen und Fallschirm, der bei einer bestimmten Fallgeschwindigkeit das Seitenfach öffnet

und den Inhalt des Abwurfbehälters freigibt. Verschiedene Einstellungen der Federkraft der Bremsklappen wurden getestet, mit der die Freigabe des Hauptfallschirms beeinflusst werden konnte. In weiteren Abwurftests im März, Mai und August 2009 wurde der Mechanismus vereinfacht und dessen Zuverlässigkeit erhöht.

### 4.3 Abwürfe im Mai 2009

Die ersten Abwürfe im Mai 2009 fanden über dem gesperrten Luftraum ED-R74 über dem Truppenübungs Gelände Altmark der Bundeswehr in der Nähe von Magdeburg statt. Die Genehmigungen für die Abwürfe wurden mit den zuständigen Behörden, der Deutschen Flugsicherung GmbH und der Bundeswehr abgestimmt. Eine Erlaubnis für die Abwürfe wurde erteilt. Während der Vorbereitung wurden die Kalibrierdaten der eingesetzten Sonden ausgelesen, um die aufgenommenen Daten später decodieren zu können. Jeder der zwei verfügbaren Abwurfbehälter wurde mit je zwei Fallsonden beladen. Eine Fallsonde wurde im Seitendeckel eingeklebt, um den Fall des Abwurfbehälters beobachten zu können. Dies würde auch der Konfiguration mit Satellitenmodem entsprechen. Die zweite Fallsonde wurde mit einem Fallschirm lose in den Abwurfbehälter gelegt und sollte frei fliegend eine Sondierung durchführen. Beim Anflug auf das Abwurfgebiet wurden die ersten Sonden initialisiert und für den Start vorbereitet. Eine Bodenmannschaft baute in der Nähe der Bundeswehrrkaserne eine Bodenstation für den Empfang der Fallsonden, ein GRAW-Empfangssystem für Radiosondenaufstiege von DFM06 Radiosonden sowie eine Vaisala Wetterstation zur Messung der Bodenwerte für die Radiosondenaufstiege auf. Über eine Funkverbindung zwischen Bodenstation und der Do-128 wurden die Abwürfe angekündigt und der Datenempfang mit den Sendefrequenzen der Fallsonden an der Bodenstation gestartet. Nach der Initialisierung der Fallsonden im Flugzeug war bei voller Sendeleistung der Fallsonden schon ein Datenempfang an der Bodenstation möglich. Nach beiden Abwürfen aus einer Höhe von etwa 6.3 km (Flightlevel(FL) 200 = 20000 Fuß) führte die Do-128 Profilflüge bis zu einer Höhe von etwa 280 m (900 Fuß) durch. Zu jedem Abwurf eines Abwurfbehälters aus der Do-128 wurde zeitgleich eine DFM06 Radiosonde an der Bodenstation gestartet. Die Dauer einer Sondierung aus 6 km Höhe wurde mit einer Fallgeschwindigkeit von  $5 \text{ ms}^{-1}$  auf ca. 20 Minuten geschätzt. Die Bodenwerte für die Radiosondenaufstiege waren während der Messphase mit Temperaturen zwischen  $13.1 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $14.7 \text{ }^\circ\text{C}$ , 50 % relativer Feuchte, Ostwind mit ca.  $3 \text{ ms}^{-1}$  bei bedecktem Himmel (8/8) ohne Niederschlag annähernd konstant.

Während der ersten Sondierung der Fallsonden und des Profilflugs der Do-128 wurde der zweite Abwurfbehälter vorbereitet. Leider wurde eine neue Fallsonde mit der selben Sendefrequenz wie eine gerade fallende Sonde initialisiert. Somit empfing der Empfänger im Flugzeug die Sondendaten der neu initialisierte Sonde aufgrund des stärkeren Sondersignals in direkter Antennennähe und verlor den Datenempfang zur fallenden Sonde. Dies zeigten die decodierten Daten in der Auswertung der Fallsonden Nr. 903913 und Nr. 903925. Die Sondendaten der Fallsonde Nr. 903913 zeigte die Sondennummer und Messdaten der neu eingeschalteten Sonde Nr. 910912 an. Dieser Fehler trat auf, weil die Sonden im Vorfeld zum Auslesen der Kalibrierdaten gerade mit dieser Einsatzfrequenz initialisiert wurden. Die

Sonde sendete nach dem Einschalten direkt mit der gleichen Frequenz im Flugzeug. Dieser Zwischenfall ist natürlich kritisch für den späteren Einsatz des Fallsondensystems und kann dort aber aufgrund der automatischen Frequenzzuweisung durch den Konfigurations-PC nicht mehr vorkommen. Eine Überlegung dieses Vorfalls war, dass der Hersteller GRAW die Sonden mit einer Frequenz nahe am Rand des meteorologischen Frequenzbands (400-406 MHz) liefert, damit neu eingeschaltete Sonden nicht unkontrolliert im verwendeten Frequenzbereich senden. Eine weitere Maßnahme wird sein, dass die Sonden im Flugzeug mit verringerter Sendeleistung initialisiert werden und die volle Sendeleistung erst nach der Freisetzung durch den Abwurfbehälter eingeschaltet wird. Durch die Entfaltung des Sondenfallschirms soll eine Steckbrücke auf der Sonde abgezogen werden und die volle Sendeleistung freischalten.

Die Ballone für die Radiosondenaufstiege wurden mit Helium für eine Aufstiegs geschwindigkeit von  $5 \text{ ms}^{-1}$  befüllt. Die Aufzeichnung der Aufstiege wurde in Abwurfhöhe der Do-128 von 6.3 km Höhe abgebrochen. Natürlich muss hier beachtet werden, dass die Messung an unterschiedlichen Orten und auch nicht zeitgleich erfolgte. Die Abbildungen 4.3 zeigen die Flugbahnen von Do-128 während des Profilflugs nach dem Abwurf in Grün, des Abwurfbehälters mit eingeklebter Fallsonde in Rot, die frei fliegende Fallsonde in Blau und die DFM06-Radiosonde in Magenta. Der Kreis an der Flugbahn der DFM06 Radiosonde markiert die Position der Bodenstation.

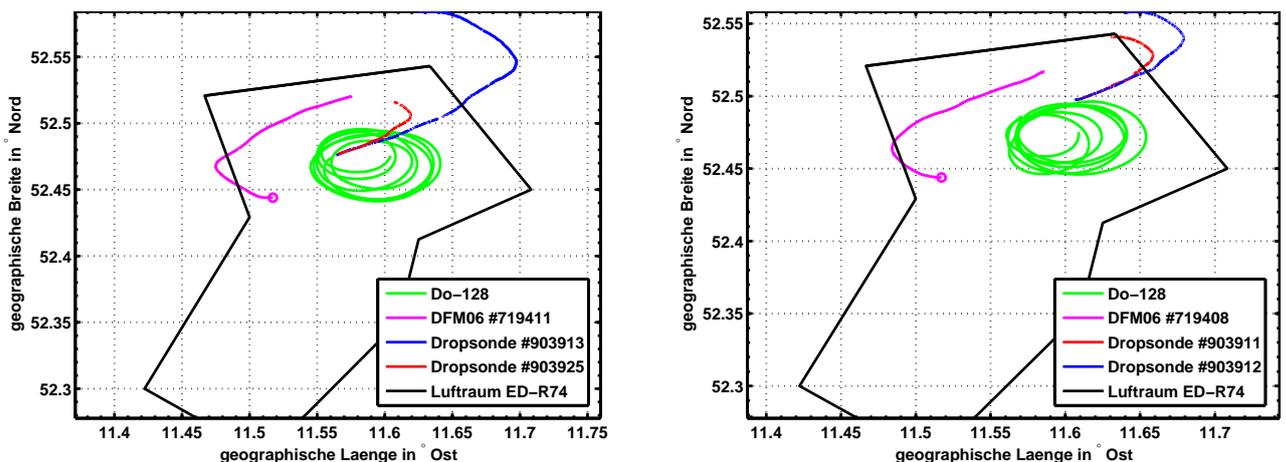


Abb. 4.1: Links: Flugbahnen der Do-128 (Profilflug) sowie Radio- und Fallsonden im ersten Abwurf über dem Luftraum ED-R74. Rechts: Flugbahnen im zweiten Abwurf.

Ein erster Vergleich der Daten von Do-128, Fallsonden und Radiosonden zeigt eine gute Übereinstimmung der Temperaturmessung (Abb. 4.3, links). Die Abweichungen erreichen maximal 0.8 K oberhalb der Wolkenschicht, wobei die Fallsonden höhere Temperaturen messen als die DFM06-Radiosonde und die Do-128, die Abweichungen sind aber kleiner als 0.8 K. Die Do-128 und die DFM06 Radiosonde messen oberhalb der Wolkenschicht die gleiche Temperatur. Unterhalb der Wolkenschicht zwischen 1.4 km und 1.9 km Höhe messen beide Fallsonden eine leichte Temperaturabnahme, die Do-128 Messung zeigt eine weitere Erwärmung. Die frei fliegende Sonde Nr. 903913 hat in diesem Bereich eine maximale Abweichung bis zu 1.7 K. Die zweite Fallsonde zeigt den Effekt nicht so ausgeprägt, da sie schneller

durch die Wolkenschicht fällt (Abb. 4.3). Eine Erklärung könnte ein benetzter Temperatursensor nach dem Durchflug der Wolkenschicht sein (Wet-Bulb-Effekt). Unterhalb der Wolkenschicht verdunstet der Wasserfilm in der trockeneren Umgebung und führt so zu einer falschen Temperaturmessung. Die Do-128 und der Aufstieg der DFM06 Radiosonde zeigen diesen Effekt nicht und messen eine konstante Temperaturänderung in diesem Höhenbereich.

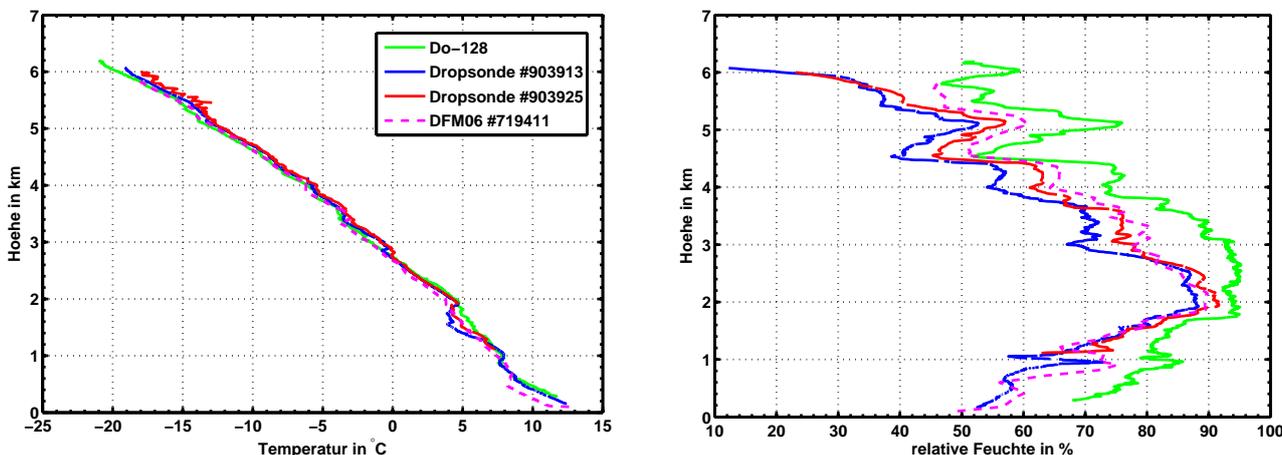


Abb. 4.2: Links: Temperaturprofil von Do-128 sowie Radio- und Fallsonden im ersten Abwurf über dem Luftraum ED-R74. Rechts: Profil der relativen Feuchte.

Das Feuchteprofil zeigt Ähnlichkeiten im Verlauf mit den Messungen der Do-128 und der DFM06 Radiosonde (Abb. 4.3, rechts). Abweichungen ergeben sich im Absolutwert der Feuchtemessung zwischen den Fallsonden und der Do-128 im Nasenmast mit einem Vaisala HUMICAP. Direkt nach dem Abwurf aus dem beheizten Flugzeug (ca. 24 °C) erkennt man zwischen 5.6 km und 6 km Höhe die verzögerte Messung der Feuchte aufgrund der schnellen Temperaturänderung und der damit anwachsenden Zeitkonstante des Feuchtesensors. Beide Fallsonden zeigen untereinander einen um bis zu 5 % relative Feuchte abweichenden Messwert. Die maximale Abweichung zur Do-128 Messung der frei fliegenden Fallsonde Nr. 903913 erreichte oberhalb von 3 km bis zu 20 % relative Feuchte. Innerhalb der Wolke zwischen 1.7 km und 3 km sind die Abweichungen zur Do-128 geringer und liegen zwischen 3 % und 7 % relativer Feuchte und nehmen unterhalb der Wolkenschicht wieder langsam zu. Die Fallsonden und die DFM06 Radiosonde messen innerhalb und unterhalb der Wolkenschicht mit einer Abweichung von weniger als 5 % relativer Feuchte untereinander (Abb. 4.3, rechts).

Der zweite Abwurf konnte von der Do-128 bis nach der Landung empfangen werden. Die Landeposition wurde durch konstante Positionsdaten in den Sondendaten festgestellt. Die Flugbahnen der Sonden zeigen kaum einen Unterschied zum ersten Abwurf (Abb. 4.3, rechts). Die frei fliegende Fallsonde Nr. 903912 flog aufgrund einer höheren Fallgeschwindigkeit nicht so weit wie die frei fliegende Fallsonde Nr. 903913 im ersten Abwurf (Abb. 4.3). Nach der Landung der Fallsonden flog die Do-128 zurück nach Braunschweig.

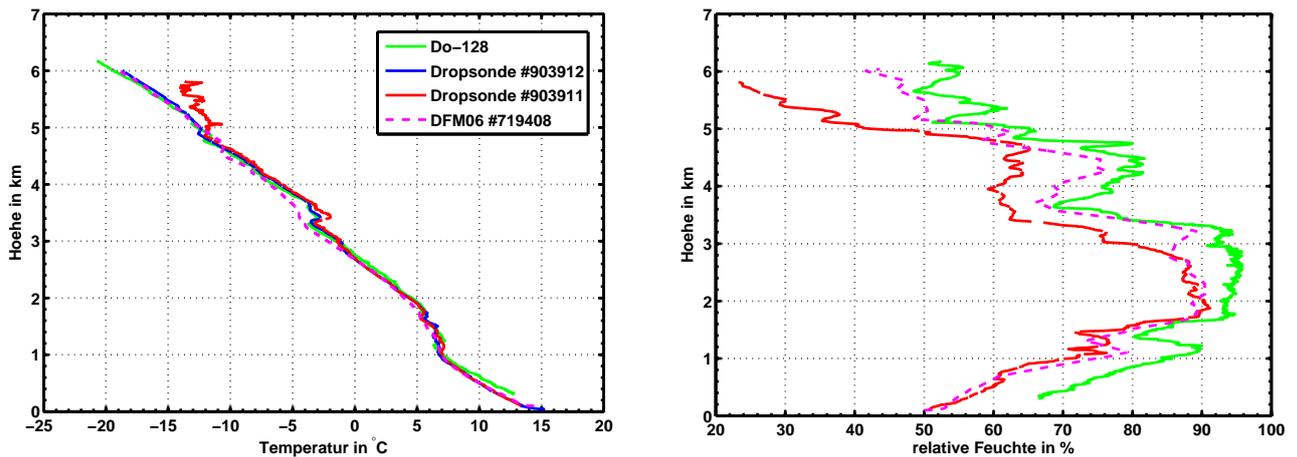


Abb. 4.3: Links: Temperaturprofil von Do-128 sowie Radio- und Fallsonden im zweiten Abwurf über dem Luftraum ED-R74. Rechts: Profil der relativen Feuchte.

Beide Fallsonden messen oberhalb von 3 km Höhe einen höheren Temperaturwert, die Abweichungen zwischen den Fallsonden und der Do-128 sind maximal 0.8 K (Abb. 4.3, links). Eine Inversion zwischen 3.3 km und 3.6 km Höhe misst die Fallsonde Nr. 903911 mit einer Abweichung bis zu 1.0 K von der Flugzeugmessung, die frei fliegende Sonde Nr. 903912 weicht von der Do-128 Messung um 0.2 K ab. Innerhalb der Wolke messen DFM06 Radiosonde und Fallsonden die gleichen Temperaturen mit einer Abweichung von 0.5 K von der Do-128. Unterhalb der Wolkenschicht messen Do-128 und beide Fallsonden zwei kleine Inversionen, die von der DFM06 Radiosonde nicht detektiert wurden. Die obere Inversion direkt unterhalb der Wolkenschicht könnte wieder ein Effekt der Verdunstungskühlung (Wet-Bulb-Effekt) sein. Die zweite Inversion in 1.2 km Höhe misst die Do-128 schärfer. Unterhalb 1 km Höhe messen die Fallsonden die gleichen Temperaturen wie die DFM06 Radiosonde beim Aufstieg. Die Abweichungen zur Do-128 nehmen unterhalb von 1 km bis auf 1.0 K zu. Beide Fallsonden landen in einem Abstand von 2 km nördlich von der Abwurfstelle. An den Flugbahnen der Fallsonden (Abb. 4.3) kann man in beiden Abwürfen sehr schön die Drehung des Windes mit der Höhe sehen. In Bodennähe wehte ein Ostwind, der mit zunehmender Höhe über Süden auf südwestliche Richtungen drehte.

Beim Abwurf des zweiten Abwurfbehälters wurde der Feuchtesensor der Fallsonde Nr. 903912 beschädigt. Nach der Initialisierung im Flugzeug wurden noch Feuchtedaten übertragen, nach dem Abwurf nicht mehr. Die Sensoren waren bei den Abwürfen nicht besonders geschützt und wurden, wie vom Hersteller GRAW empfohlen, ohne Schutzkappe betrieben. Die Fallsonde Nr. 903911 im Abwurfbehälter zeigt, wie im ersten Abwurf, nach der Freisetzung einen langsamen Anstieg der relativen Feuchte nach dem Abwurf aus dem beheizten Flugzeug (Abb. 4.3, rechts) aufgrund der sich schnell ändernden Zeitkonstante des Feuchtesensors bei starker Temperaturabnahme (bei +20 °C:  $\tau \approx 0.6$  s bei -20 °C:  $\tau \approx 4.5$  s, siehe Tab. 2.3). Die Fallsonde Nr. 903911 hat über das gesamte Profil eine Abweichung von etwa 15 % relative Feuchte von der Do-128. Im Bereich der Wolkenschicht zwischen 2 km und 3 km Höhe ist die Abweichung etwas geringer bei knapp unter 5 % relativer Feuchte. Die DFM06 Radio-

sonde liegt zwischen der Do-128 und der Fallsonde Nr. 903911. Unterhalb der Wolkenschicht messen die beiden GRAW-Sonden eine ähnliche Feuchte mit Abweichungen weniger als 5 % relativer Feuchte untereinander.

Ein direkter Vergleich der Fallsonden wie bei den Tandemaufstiegen ist hier nicht möglich, da die Fallsonden eine deutlich unterschiedliche Fallgeschwindigkeit erreichten (Abb. 4.3). Die frei fliegen-

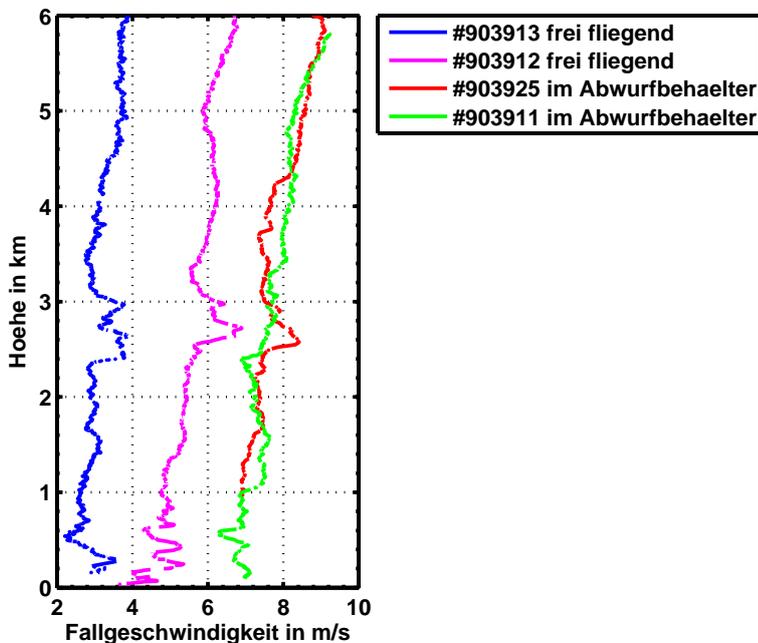


Abb. 4.4: Fallgeschwindigkeiten der Fallsonden frei fliegend und im Abwurfbehälter der beiden Abwürfe.

de Fallsonde Nr. 903913 erreicht eine mittlere Fallgeschwindigkeit von  $3.2 \text{ ms}^{-1}$ . Die ebenfalls frei fliegende Fallsonden Nr. 903912 erreicht eine mittlere Fallgeschwindigkeit von  $5.6 \text{ ms}^{-1}$ . Die beiden eingeklebten Fallsonden im Abwurfbehälter zeigen ähnliche Fallgeschwindigkeiten mit  $7.7 \text{ ms}^{-1}$  und  $7.8 \text{ ms}^{-1}$ . In drei Fällen zeigt sich im oberen Bereich der Wolkenschicht zwischen 2.4 km und 3 km ein Abwindbereich mit erhöhten Fallgeschwindigkeiten.

Die Testabwürfe zeigten, dass das eingesetzte System funktioniert und die Sondendaten an der Bodenstation und in der Do-128 empfangen und gespeichert werden konnten. Ein qualitativer Vergleich der Messwerte zeigt, dass die Fallsonden die Verläufe der gemessenen Profile der Do-128 gut wiedergeben können. Die Temperaturmessung war gut und die Abweichungen von der Do-128 gering und meist kleiner als 1 K. Oberhalb der Wolkenschicht könnte der Einfluss der Strahlung zu den leicht höheren Temperaturen führen (+0.5 K, Nash et al. (2006)), nach dem Durchflug der Wolkenschicht zwischen 2 km und 3 km Höhe führte ein Benetzen der Temperatursensoren zu einer fehlerhaften Temperaturmessung (Wet-Bulb-Effekt) direkt unterhalb der Wolkenschicht. Die Absolutwerte der Feuchtemessungen zeigen bei der relativen Feuchte eine Abweichung von bis zu 20 % relativer Feuchte zur Do-128. Der Vergleich zur DFM06 Radiosonde zeigt geringere Abweichungen zwischen 3 % und 10 % relative Feuch-

te. Eine Separierung der Sonden konnte nicht eingehend geprüft werden, da die Fallgeschwindigkeiten zu unterschiedlich waren, da eine Sonde fest mit dem Abwurfbehälter verbunden war. Auch zwischen den beiden frei fliegenden Fallsonden ist eine Abweichung von etwa  $2 \text{ ms}^{-1}$  in der Fallgeschwindigkeit festzustellen.

#### 4.4 Abwürfe im August 2009

Im August 2009 wurde ein zweiter Abwurftest der Fallsonden mit der Do-128 durchgeführt. Die Planungen und Vorbereitungen entsprachen denen vom Mai. Insgesamt wurden drei Abwurfbehälter mit je zwei Fallsonden abgeworfen. Zwei Abwurfbehälter hatten wie im Mai eine Fallsonde in den Seitendeckel eingeklebt und eine Sonde lose geladen. Der dritte Abwurfbehälter war mit zwei losen Sonden bestückt, um die räumliche Trennung der Sonden während des Falls zu untersuchen. Die Bodenstation wurde an der selben Stelle wie im Mai in der Nähe des Truppenübungsplatzes Altmark bei Magdeburg aufgebaut. Zu den Abwürfen aus dem Flugzeug wurden zeitgleich Radiosondenaufstiege mit DFM06 Radiosonden bis zur Abwurfhöhe durchgeführt. Die Do-128 flog nach jedem Abwurf ein Profil von der Abwurfhöhe 20000 Fuß (Flightlevel (FL) 200) bis etwa 900 Fuß. Um einen Datenverlust durch unbeabsichtigtes Einschalten von Sonden auf belegten Frequenzen zu vermeiden, wurden während der Vorbereitungen alle Fallsonden mit einer für den Abwurf festgelegten Frequenz initialisiert und die Kalibrierdaten ausgelesen. Im Flugzeug wurde die Initialisierung wieder mit einem Laptop durchgeführt. Eine Datenspeicherung misslang im Flugzeug, da der Laptop bei Festplattenzugriffen der Datenaufzeichnung ab FL150 abstürzte, weil die Festplatte des Laptops nicht für den Druckbereich in der Abwurfhöhe spezifiziert war und die Do-128 über keine Druckkabine verfügt. Die Festplatte musste wenige Wochen nach dem Test wegen eines Defekts ausgewechselt werden. Im Flugzeug konnten die empfangenen Daten nur visuell dargestellt und bis zur Landung beobachtet werden. Die Initialisierung der Fallsonden für die weiteren Abwürfe wurden nach der Landung der fliegenden Fallsonden während der Profilflüge mit dem in niedrigerer Höhe wieder funktionsfähigen Laptop durchgeführt. Die Datenaufzeichnung an der Bodenstation funktionierte problemlos. Die Sondierung konnte jedoch nicht bis zur Landung vollständig aufgezeichnet werden. Der Datenempfang brach noch während der Sondierung ab. Die Bodenwerte für die Radiosonde änderten sich während der drei Abwürfe nur gering. Die Temperatur stieg leicht von  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  bei einer Luftfeuchte von knapp 40 % relative Feuchte an. Die Windverhältnisse waren konstant mit einer Windgeschwindigkeit von  $3 \text{ ms}^{-1}$  aus Südost ( $150^\circ$ ).

Nach der Landung der Fallsonden wurde die beobachteten Sondenpositionen vom Flugzeug an die Bodenmannschaft gefunkt. Mit einem Navigationsgerät und einem Laptop mit „Google Earth“ konnten die Sondenpositionen auf der Landkarte bestimmt werden. Mit dem Auto wurde so nahe wie möglich an die Landeposition herangefahren. Mit einem GPS-Handempfänger und einem ICOM-Handempfänger konnten die Sonden aus Äckern und Wäldern geborgen werden. Mit Hilfe eines ICOM-Handempfängers, eingestellt auf die Frequenz der Sonden, konnte überprüft werden, ob die Sonden noch aktiv Daten senden und die Sonden angepeilt werden. Insgesamt konnten drei von vier frei fliegenden Sonden und

die zwei Abwurfbehälter mit eingeklebter Fallsonde wieder gefunden werden. Die letzte Sonde wurde aus Zeitgründen aufgegeben, der dritte Abwurfbehälter ging an unbekannter Position nieder.

Die Abwurfposition und Flugbahnen der Sonden waren bei allen drei Abwürfen ähnlich (Abb. 4.5), die Flugbahn der Do-128 ist in Grün, die der frei fliegenden Fallsonden sind in Blau und die der eingeklebten Sonden im Abwurfbehälter in Rot dargestellt. Die Flugbahn der DFM06 Radiosonde ist in Magenta dargestellt. Der Kreis an der Flugbahn der DFM06 Radiosonde markiert wiederum die Position der Bodenstation.

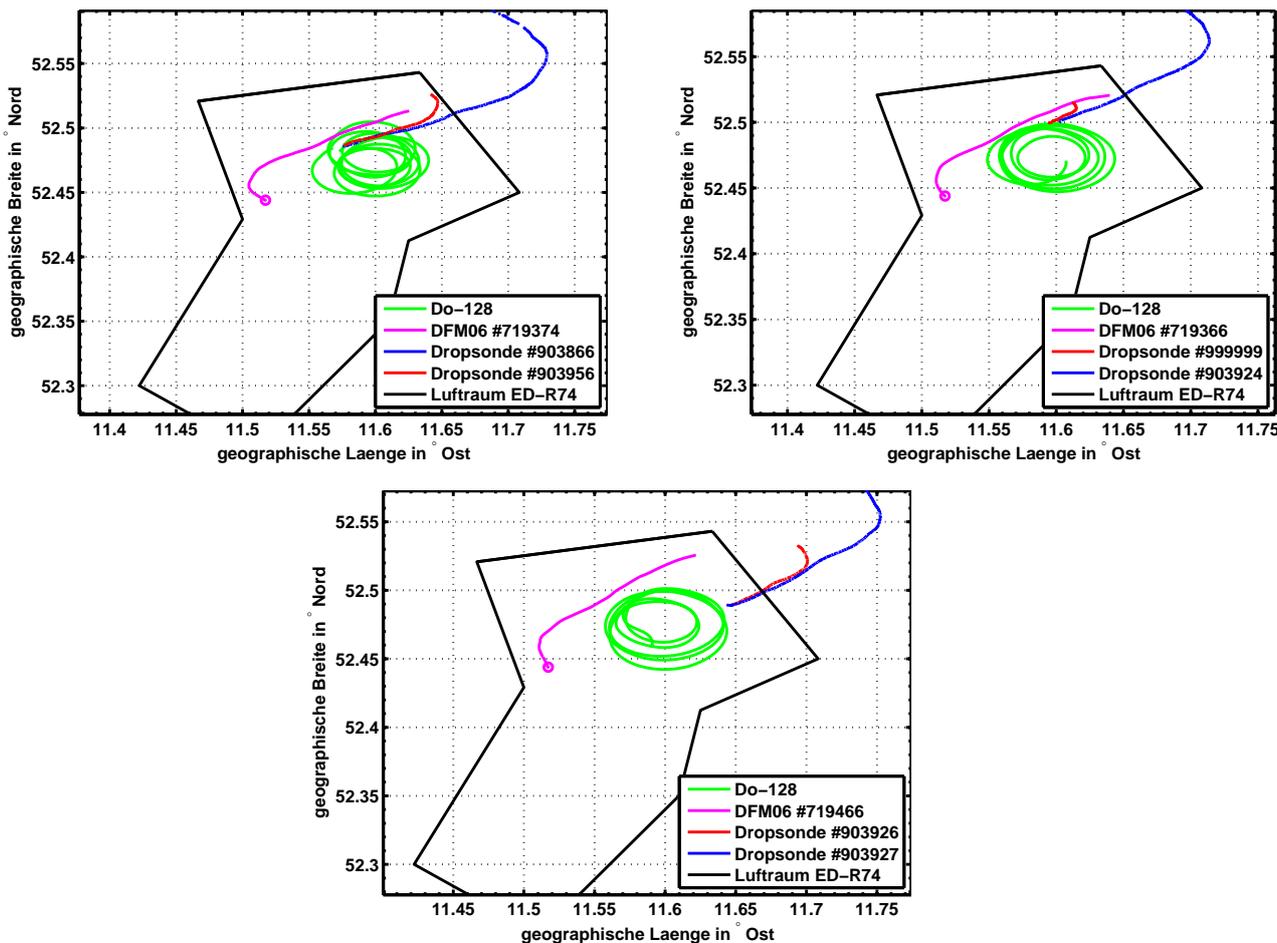


Abb. 4.5: Flugbahnen der Do-128 (Profilflug) sowie Radio- und Fallsonden im ersten Abwurf über dem Luftraum ED-R74. Links: Erster Abwurf. Rechts: Zweiter Abwurf. Unten: Dritter Abwurf.

Der qualitative Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung bei der Temperaturmessung im ersten Abwurf. Die Abweichungen der Fallsonden von der Do-128-Messung ist kleiner als 1.0 K, die größten Abweichungen finden sich zwischen 4 km und 6 km Höhe (Abb. 4.6, links). Darunter liegen die Abweichungen meist in Bereich von 0.2 K bis 0.8 K. Die Fallsonden haben zu der DFM06-Radiosonde Abweichungen zwischen 0.2 K und 0.8 K. Die Fallsonde 903956 sendet keine Temperatur- und Feuchtedaten nach der Initialisierung im Flugzeug. In vorigen Funktionstests der Sonde waren diese Probleme nicht aufgetaucht. Die GPS-Daten der Sonde werden übertragen, siehe Abb. 4.5.

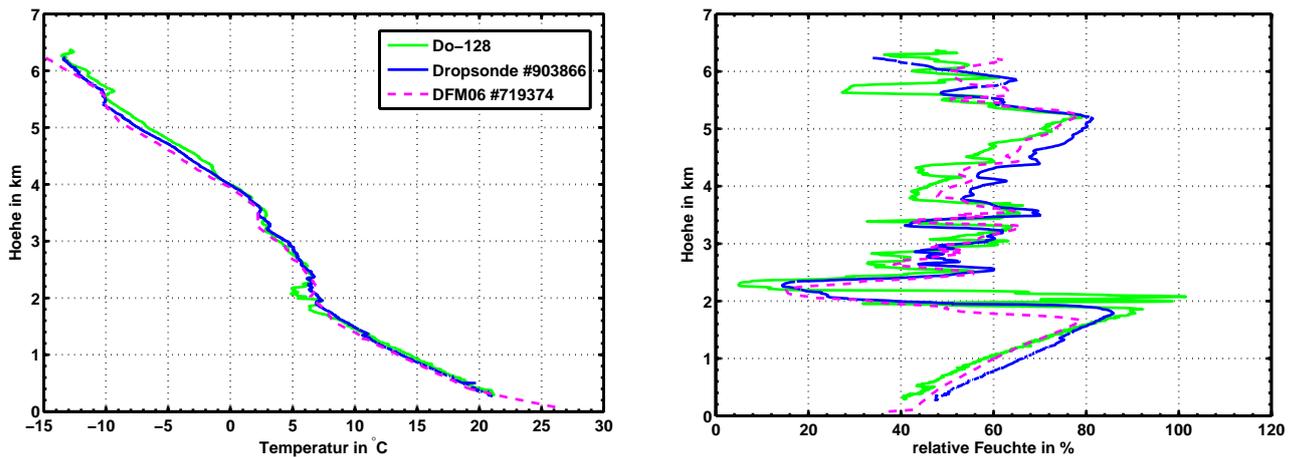


Abb. 4.6: Links: Temperaturprofil von Do-128 sowie Radio- und Fallsonden im ersten Abwurf über dem Luftraum ED-R74. Rechts: Profil der relativen Feuchte.

Das Feuchteprofil wird im Verlauf gut wiedergegeben, die Fallsonde und die DFM06 Radiosonde messen meist einen größeren Feuchtwert als die Do-128 (Abb. 4.6, rechts). Auffällig ist, dass die Bereiche hoher und niedriger Feuchte der Sondierung mit den Do-128 Messungen weitgehend übereinstimmen, vor allem der Bereich zwischen 2 km und 2.5 km Höhe mit niedrigen Feuchtwerten wird sehr gut wiedergegeben, sowie die Feuchtezunahme auf über 80 % relative Feuchte darunter. Es wird damit gezeigt, dass der Feuchtesensor der Fallsonde schnelle Feuchteänderungen gut messen kann. Die Abweichungen von der Do-128 sind während des Profils kleiner als 10 % relative Feuchte. Meist misst die Fallsonde einen höheren Feuchtwert. Bei dem schnellen Anstieg unterhalb der trockenen Schicht knapp unter 2 km Höhe misst die Do-128 einen höheren Feuchtwert als die Fallsonde. Die DFM06-Radiosonde liegt zwischen den Messungen der Fallsonde und Do-128.

Beim zweiten Abwurf sendete die Fallsonde 903924 nach der Initialisierung keine Temperatur- und Feuchtedaten und verhält sich wie die Fallsonde 903956 im ersten Abwurf. Die GPS-Position und Fallgeschwindigkeit wurde übertragen (Abb. 4.5). Die Fallsonde 999999 ist der erste Prototyp der Fallsonde und ist nicht kalibriert. Von dieser Sonde waren keine realistischen Messwerte von Temperatur und Feuchte zu erwarten. Sie wurde bewusst nur als Positionsgeber eingesetzt. Die GPS-Daten der Prototypsonde wurden übertragen und konnten decodiert werden.

Der dritte Abwurf mit zwei frei fliegenden Fallsonden (Nr. 903926 und Nr. 903927) war erfolgreich, beide Sonden sendeten Temperatur-, Feuchte- und GPS-Daten. Die Abweichungen der Temperaturmessungen von denen der Do-128 sind kleiner als 0.8 K und damit ähnlich wie im ersten Abwurf (Abb. 4.7, links). Die Messungen von Do-128 und Fallsonde Nr. 903927 zeigen in der Struktur eine gute Übereinstimmung. Zwischen 2 km und 2.8 km messen beide einen etwas unterschiedlichen Verlauf, aufgrund ihrer unterschiedlichen Position. Unterhalb von 2 km Höhe sind die Abweichungen kleiner als 0.5 K und stimmen gut mit der Do-128 Messung überein. Beide Fallsonden messen mit geringen Abweichungen die gleiche Temperatur. Zwischen 2 km und 2.8 km Höhe löst die Fallsonde Nr. 903926 die Temperaturstruktur nur andeutungsweise auf. Unterhalb davon messen beide Fallsonden wieder die selbe Temperatur.

Eine Ursache für die unterschiedliche Messung der Fallsonde Nr. 903926 kann die hohe Fallgeschwindigkeit von im Mittel über  $8.3 \text{ ms}^{-1}$  sein, während die Fallsonde Nr. 903927 mit einer Geschwindigkeit von  $4.1 \text{ ms}^{-1}$  etwa halb so schnell fiel. Diese großen Unterschiede in der Fallgeschwindigkeit zwischen den frei fliegenden Sonden sind auf Beschädigungen der Sondenfallschirme zurückzuführen (Abb. 4.8).

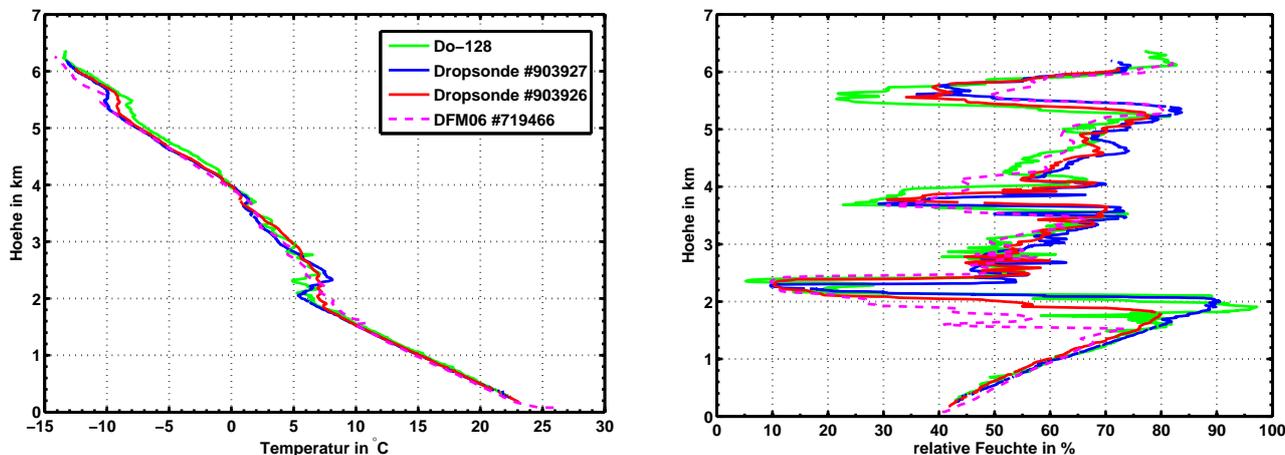


Abb. 4.7: Links: Temperaturprofil von Do-128 sowie Radio- und Fallsonden im dritten Abwurf von zwei frei fliegenden Sonden über dem Luftraum ED-R74. Rechts: Profil der relativen Feuchte.

Das Feuchteprofil wird von beiden Fallsonden sehr gut wiedergegeben. Die Abweichungen von der Do-128 sind kleiner als 10 % relative Feuchte (Abb. 4.7, rechts). Die Feuchtemessung der Do-128 wurde vor dem Flug neu kalibriert. Die Struktur des Profils wird vor allem von der Fallsonde Nr. 903027 gut wiedergegeben, die Fallsonde Nr. 903926 zeigt aufgrund ihrer höheren Fallgeschwindigkeit vor allem bei schnellen Feuchteänderungen eine Verzögerung der Feuchtemessung aufgrund der Zeitkonstante des Feuchtesensors. Dies ist z.B. zwischen 4.2 km und 4.8 km Höhe oder unterhalb von 2 km Höhe gut sichtbar. Dennoch ist die Messung der Fallsonde Nr. 903926 trotz der großen Fallgeschwindigkeit ähnlich zur langsam fliegenden Fallsonde Nr. 903927. Dies zeigt, dass auch bei hohen Fallgeschwindigkeiten vernünftige Messungen möglich sind. Die DFM06 Radiosonde misst meist Werte zwischen den Fallsonden und der Do-128 und zeigt in Bodennähe einen Bereich geringer Feuchte, den auch die Do-128 auflöst, die beiden Fallsonden aufgrund der unterschiedlichen Position jedoch nicht.

Die räumliche Trennung der Fallsonden sollte durch den dritten Abwurf mit zwei frei fliegenden Fallsonden Nr. 903926 und Nr. 902927 gezeigt werden. Doch die deutlich unterschiedlichen Fallgeschwindigkeiten beider Sonden ließen dies letztendlich nicht zu (Abb. 4.8). Das gleiche gilt für die ersten beiden Abwürfe mit einer frei fliegenden Sonde und einer eingeklebten Sonde im Abwurfbehälter. Die Fallsonde Nr. 903866 gerät in Bodennähe in zwei Aufwindbereiche und steigt sogar wieder etwas in die Höhe (Abb. 4.8). Die Fallgeschwindigkeit dieser Sonde ist mit etwa  $3 \text{ ms}^{-1}$  die geringste aller abgeworfenen Sonden. Diese Sonde wurde aus Zeitgründen aber nicht geborgen. Bei allen geborgenen frei fliegenden Sonden konnten Beschädigungen an den PVC-Fallschirmen der Sonden festgestellt werden. Die Fallschirme waren zum Teil eingerissen, bei der Fallsonde Nr. 903926 war der Schirm vollständig gerissen und bot kaum einen Luftwiderstand, darum fiel diese Sonde auch doppelt so schnell wie die anderen frei

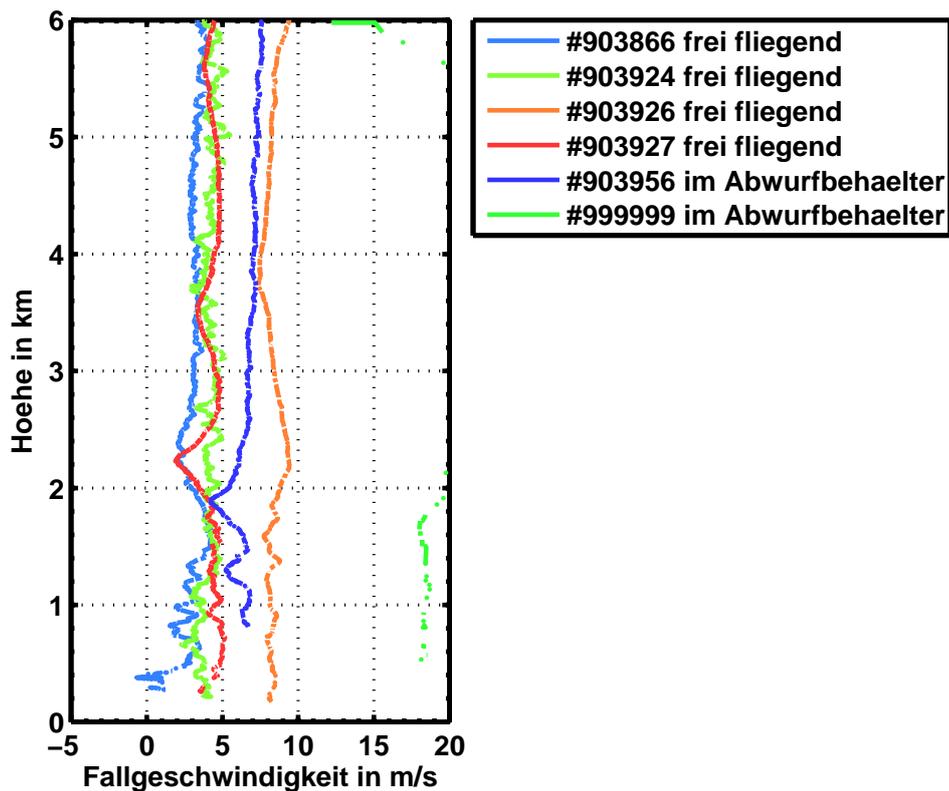


Abb. 4.8: Fallgeschwindigkeiten der Sonden während der Sondierung. Farblich gleiche Sonden wurden zusammen abgeworfen.

fliegenden Sonden Nr. 903866, Nr. 903924 und Nr. 903927. Die Fallgeschwindigkeiten dieser frei fliegenden Sonden sind ähnlich zu denen im Mai abgeworfenen Sonden, die damals jedoch nicht geborgen wurden. Aufgrund der ähnlichen Fallgeschwindigkeiten müssen daher also schon im Mai leichte Beschädigungen der Fallschirmen aufgetreten sein. Auch bei den Abwurfbehältern gab es einen großen Unterschied in der Fallgeschwindigkeit. Der Abwurfbehälter mit der Prototypensonde 999999 verlor im Flug kurz nach dem Abwurf den Hauptfallschirm und fiel mit einer Geschwindigkeit  $>16 \text{ ms}^{-1}$  zu Boden, siehe die vereinzelt Werte der Fallgeschwindigkeit in Abb. 4.8 ganz links. Vermutlich war die Fallgeschwindigkeit zeitweise  $>20 \text{ ms}^{-1}$ . Überraschend war, dass der Abwurfbehälter mit der Sonde ohne Beschädigung und ohne Hauptfallschirm in einem Waldstück gefunden werden konnte. Der zweite unbeschadet geborgene Abwurfbehälter hatte mit etwa  $6.6 \text{ ms}^{-1}$  im Vergleich zu den Abwürfen im Mai eine ähnliche Fallgeschwindigkeit.

Die Abwurftests im August 2009 bestätigen die Funktion des Systems. Aufgrund des Problems mit der Datenaufzeichnung mit dem Laptop im Flugzeug stehen im August nur unvollständige Daten der Sondierung von der Bodenstation zur Verfügung. Die frei fliegenden Sonden konnten bis zu einer Höhe von 170 m bis 250 m empfangen werden, die Sonden in den Abwurfbehältern bis etwa 460 m bzw. 800 m Höhe. Die Messungen der Fallsonden zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Profilmessungen der

Do-128 und den zeitgleich durchgeführten Radiosondenaufstiegen. Die Abweichungen sind klein und könnten durch räumliche Unterschiede und Strahlungseffekte erklärt werden. Die Feuchtemessung der Fallsonden stimmt gut mit der Messung der Do-128 und der DFM06 Radiosonde überein. Der Feuchtesensor zeigt in dieser Messung seine Tauglichkeit aufgrund der sich schnell ändernden Feuchte während der Sondierung (Abb. 4.7, rechts). Das Feuchteprofil messen die Fallsonden meist mit etwas höheren Feuchtwerten als die Do-128. Die Bergung der Sonden gelang mit den übermittelten Landepositionen der Sonden mittels einem GPS-Handempfänger und einem ICOM-Handempfänger. Fünf von sechs Fallsonden und zwei von drei Abwurfbehältern konnten geborgen werden. Dabei wurden Beschädigungen der Sondenfallschirme festgestellt, die die deutlich unterschiedlichen Fallgeschwindigkeiten erklären.

## 5 Auswertung und Interpretation der Profile

### 5.1 Auswertung eines Profils

Die gemessenen Profile von Fallsonden oder Radiosonden können in thermodynamischen Diagrammpapieren, wie dem Stüve-Diagramm oder dem (skew T/log p)-Diagramm dargestellt werden. Dargestellt wird die sogenannte geometrische Zustandskurve oder Temp mit dem Temperatur- (T) und Taupunktprofil (Td) der Messung (Abb. 5.1). Der Temp wird unter den idealisierten Annahmen der Messung eines Profils an einem festen Ort und zur gleichen Zeit ausgewertet. Damit wird die Flugbahn von Fallsonden und Radiosonden vernachlässigt, ebenso die Messdauer für die Sondierung. Beispielsweise dauerte die Messung des Radiosondenaufstieges des DWD in Lindenberg am 01.12.2009 um 12 UTC bis in knapp 35 km Höhe ca. 100 Minuten. Der Sondendrift kann je nach vorherrschenden Windverhältnissen sehr groß sein. Mit der Auswertung des Temps lässt sich die Schichtung der Atmosphäre bestimmen und abschätzen, welchen Kräften ein Luftpaket ausgesetzt würde, wenn es vertikal verschoben würde. Damit lässt sich die thermische Stabilität der Atmosphäre feststellen. Die Zustandsänderung des betrachteten Luftpakets wird unter der Voraussetzung eines geschlossenen Systems, indem kein Massenaustausch mit der Umgebung und keine Phasenumwandlungen auftreten, als adiabatisch angenommen. Zustandsänderungen mit Niederschlagsbildung in einem offenen System, d.h. dass der Niederschlag das System verlassen kann, werden als pseudoadiabatisch angenommen. Eine wichtige Größe die in diesem Zusammenhang beachtet werden muss, ist die Luftfeuchte. Wasser ist in der Atmosphäre ein Energieträger, da es mit seinen Phasenumwandlungen als signifikante Energiequelle oder -senke wirkt. Den Einfluss der Luftfeuchte kann z.B über die virtuelle Temperatur

$$T_v = T \cdot (1 + 0.6077q) \quad [5.1]$$

mit dem Mischungsverhältnis  $q$  berücksichtigt werden.

Das Stüve-Diagramm wird durch die Temperatur in °C als Abszisse und den Druck  $p^{Kl}$  als Ordinate aufgespannt (Abb. 5.1). Die Druckachse wird mit dem Adiabatenexponenten für trockene Luft  $\kappa_l = R_l/c_{pl}$  berechnet, so dass sich die Trockenadiabaten im Nullpunkt  $K = 0 \text{ K}$  schneiden. Die Trockenadiabaten sind als konstante potentielle Temperaturen  $\Theta$  in grünen durchgezogenen Linien aufgetragen. Die Pseudoadiabaten sind als konstante pseudopotientielle Temperatur  $\Theta_{ps}$  als rote gekrümmte durchgezogene Linien eingezeichnet, die mit abnehmenden Druck sich asymptotisch den jeweiligen Trockenadiabaten mit gleichem Wert nähern. Die Sättigungsmischungsverhältnisse  $r$  sind als graue gestrichelte Linien eingetragen.

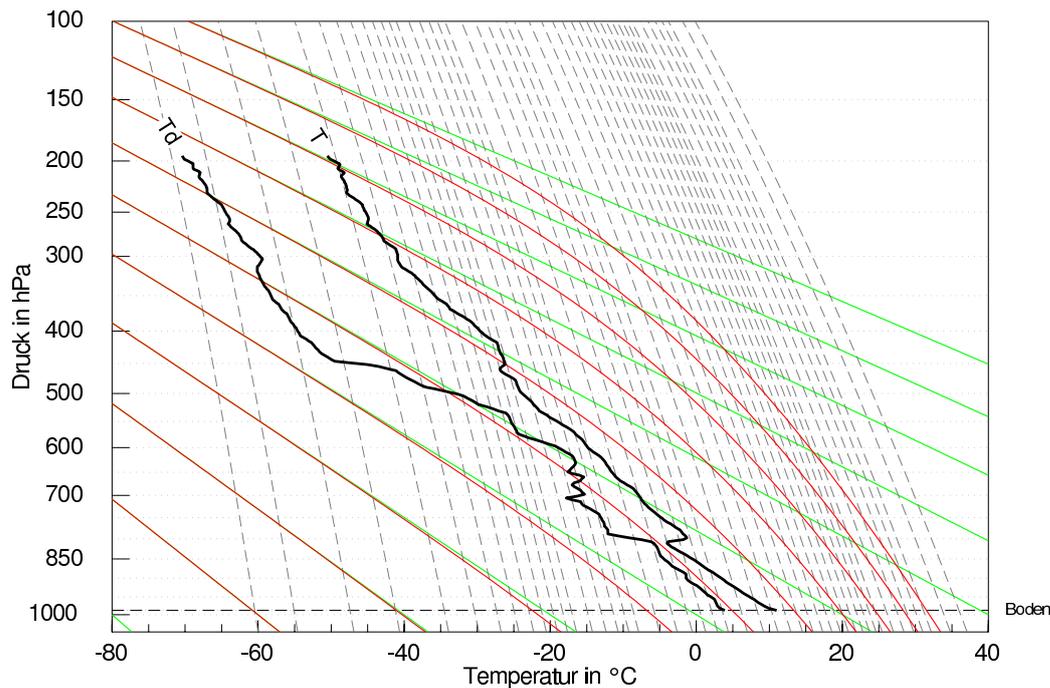


Abb. 5.1: Stüve-Diagramm mit dem Temp des Aufstiegs am 03.11.2009, 12 UTC

## 5.2 Ableitbare Größen

Durch die vertikale Verschiebung von Luftpaketen können für einen konkreten Temp verschiedene Kondensationsniveaus bestimmt werden.

- Hebungskondensationsniveau:

Das Hebungskondensationsniveau (HKN) wird in der Höhe bzw. bei dem Druck erreicht, wo sich die Linien der Trockenadiabate der Bodentemperatur mit dem Sättigungsmischungsverhältnis des Bodentaupunkts schneiden. Das HKN wird erreicht, wenn Luft durch orographische Hindernisse, z.B. an Bergen, gezwungen wird adiabatisch aufzusteigen, bis die Luft gesättigt ist und Wolkenbildung einsetzen kann.

- Kumuluskondensationsniveau:

Das Kumuluskondensationsniveau (KKN) gibt die Sättigungshöhe von aktiv aufsteigender Luft an. Sie lässt sich im Temp dort finden, wo sich die Temperaturkurve mit der der Linie des Sättigungsmischungsverhältnisses des Bodentaupunkts schneidet. Ab dieser Höhe ist mit der Bildung von Kumuluswolken zu rechnen. Aus dem KKN lässt sich die sogenannte Auslösetemperatur bestimmen, indem vom KKN trockenadiabatisch zum Boden absteigt. Wird diese Bodentemperatur (2 m-Temperatur) tagsüber erreicht oder überschritten ist Konvektion durch den thermischen Antrieb möglich. Dieses Konzept muss zwei Voraussetzungen erfüllen: Zum einen, dass die Luftmasse vertikal gut durchmischt und adiabatisch geschichtet ist und zum anderen sich der Temp

in der Höhe zeitlich nicht ändert. Ideal sind statische Verhältnisse, d.h ohne Advektion anderer Luftmassen.

- Niveau der freien Konvektion:

Das Niveau der freien Konvektion (NFK) ist in der Höhe zu finden, wo die Pseudoadiabate ausgehend vom HKN die Temperaturkurve schneidet. Steigt das Luftpaket weiter pseudoadiabatisch auf, liegt das Luftpaket dann rechts von der Temperaturkurve und ist damit wärmer als die Umgebung. Es erfährt einen Auftrieb und kann weiter aufsteigen.

- Wolkenobergrenzen:

Aus dem KKN und NFK lassen sich Wolkenobergrenzen (WO) abschätzen. Dazu geht man von beiden Niveaus aus und folgt der zugehörigen Pseudoadiabate, bis diese die Temperaturkurve schneidet. Ab diesem Punkt wäre das Luftpaket wieder kälter als die Umgebung und würde nicht weiter aufsteigen. Dies ist dann das Niveau des neutralen Auftriebs (Equilibrium Level (EL)). In dieser Höhe sind die Wolkenobergrenzen zu erwarten, dabei wird aber der Vertikalimpuls innerhalb einer Wolke vernachlässigt.

### 5.2.1 Konvektionsindizes

Damit Luftpakete selbständig aufsteigen können, müssen sie einen positiven Auftrieb haben. Dies ist der Fall, wenn die gehobene Luft wärmer ist als ihre Umgebung, z.B durch passive Hebung an der Orographie, thermischen Auftrieb durch Erwärmung oder Durchmischung. Über die vertikale Bewegungsgleichung lässt sich mit der hydrostatischen Approximation, der Gleichung für ideale Gase, ein Auftriebsterm  $B$  ableiten (Trier, 2003):

$$B = g \left( \frac{\Theta_{v,p}(z) - \Theta_v(z)}{\Theta_v(z)} \right) . \quad [5.2]$$

Die virtuelle potentielle Temperatur  $\Theta_{v,p}$  ist die Temperatur des Luftpakets  $p$  (parcel) in der Höhe  $z$  und  $\Theta_v$  ist die virtuelle potentielle Temperatur der Umgebung. Bei einer vertikalen Verschiebung eines Luftpakets muss nun der vertikale Temperaturgradient des Luftpakets und deren Umgebung betrachtet werden. Bei der Verschiebung des Luftpakets ist nun die Luftfeuchte zu betrachten.

Bleibt ein Luftpaket nach der Verschiebung ungesättigt und ist der vertikale Temperaturgradient der Umgebung größer als die des Luftpakets, so ist das Luftpaket in der Höhe  $z$  kälter als seine Umgebung. Es hat dann einen negativen Auftrieb und sinkt wieder auf sein Ausgangsniveau zurück.

Da das Mischungsverhältnis in einem Luftpaket konstant ist, kann bei einer vertikalen Verschiebung Sättigung erreicht werden. Damit ändert sich der vertikale Temperaturgradient vom trockenadiabatischen Temperaturgradienten ( $dT/dz \approx 0.98 \text{ K}/100 \text{ m}$ ) zum feuchtadiabatischen Temperaturgradienten ( $dT/dz \approx 0.65 \text{ K}/100 \text{ m}$ ). Durch die Kondensation von Wasserdampf wird latente Wärme frei und reduziert den vertikalen Temperaturgradienten. Liegt der vertikale Temperaturgradient der Umgebung zwischen dem trocken- und feuchtadiabatischen Temperaturgradienten wird die Luftschicht bedingt labil

genannt (DWD Wetterlexikon<sup>1</sup>). Die Bedingung der Labilität ist nur für gesättigte Luft gegeben. Bezüglich des feuchtadiabatischen Temperaturgradienten ist die Atmosphäre labil geschichtet, bezüglich des trockenadiabatischen Temperaturgradienten aber stabil geschichtet.

Die latente Labilität ergibt sich durch pseudoadiabatische Hebung eines feuchten Luftpakets in eine trockenere und kältere Luftschicht. Diese Bedingung entspricht dem NFK. Oberhalb des NFK erfährt das Luftpaket einen positiven Auftrieb und kann weiter aufsteigen.

Die potentielle Labilität wird durch Hebung der gesamten Luftsäule ausgelöst. Voraussetzung ist ein stark abnehmender Feuchtegehalt vom Boden bis in größere Höhen. Durch die Hebung der gesamten Luftsäule erreicht die bodennahe Luft schneller ihre Sättigung und kühlt sich beim weiteren Aufstieg nicht so stark ab, wie die trockenere kalte Luft darüber. Damit tritt eine Labilisierung der Luftschichten ein (DWD Wetterlexikon).

Durch die Ableitung von Konvektionsindizes aus einem Temp lassen sich Aussagen über den Labilitätszustand der Troposphäre machen. Die Indizes wurden entwickelt, um die Entwicklung von Konvektion abzuschätzen, ob also Auslösung von Konvektion stattfindet und wie intensiv die Konvektion werden kann. In verschiedenen Studien zu Konvektionsindizes zur Vorhersage von Gewittern (Kunz (2007), Haklander und Delden (2003), Huntrieser et al. (1996)) wurden für einen längeren Zeitraum Radiosondenaufstiege einer Station mit anderen Datensätzen kombiniert und die Konvektionsindizes berechnet und statistisch ausgewertet. Die statistische Auswertung zeigt, welche der Indizes eine Entwicklung von Konvektion oder Gewittern mit großer Wahrscheinlichkeit vorhersagen können. Die Ergebnisse der Studien basieren auf einer Kontingenzstabelle und zeigen zum Teil deutliche Unterschiede in den Ergebnissen der Wahrscheinlichkeiten für die Vorhersage von Konvektion oder Auslösung von Gewittern für die einzelnen Indizes und deren Abhängigkeit vom betrachteten Gebiet.

Die Indizes lassen sich in drei Gruppen einteilen, um die Stabilität der Troposphäre als bedingt labil, latent labil oder potentiell labil zu beschreiben. Meist gehen nur Temperatur- und Feuchtegrößen in verschiedenen Höhengniveaus ein. Wenige Indizes berücksichtigen noch dynamische Größen, wie Windscherung, Änderung der Windgeschwindigkeit und Drehung mit der Höhe, wie z.B. der SWISS-Index (Huntrieser et al., 1996) oder der Severe Weather Threat (SWEAT) Index.

Eine Übersicht und Berechnung von bekannten Konvektionsindizes (Haklander und Delden, 2003):

- Convective Available Potential Energy (CAPE) gibt einen Energiewert in  $\text{J kg}^{-1}$  an, der dem Luftpaket für einen weiteren Auftrieb ab den HKN oder KKN zur Verfügung steht. Ab dem HKN oder KKN ist der weitere Aufstieg pseudoadiabatisch, die Kondensation von Wasserdampf setzt Energie frei, die dem Luftpaket zur Verfügung steht. Mit dem berechneten Wert der CAPE kann man die Intensität der Konvektion abschätzen. In Tab. 5.1 sind typische Werte für die CAPE angege-

---

<sup>1</sup><http://www.dwd.de/lexikon>

ben. Die CAPE wird ab dem Niveau des Auftriebs  $p_B$ , dem KKN oder NFK, bis zum Niveau des neutralen Auftriebs  $p_{EL}$  berechnet:

$$CAPE = R_l \cdot \int_{p_B}^{p_{EL}} (T_{v,p} - T_v) d \ln p . \quad [5.3]$$

Mit der Gleichung für ideale Gase und der hydrostatischen Approximation ergibt sich auch:

$$CAPE = g \cdot \int_{z_B}^{z_{EL}} \frac{\Theta_{v,p} - \Theta_v}{\Theta_v} dz . \quad [5.4]$$

Mit der CAPE kann unter der Annahme, dass durch die Kondensation freiwerdende Energie nur

Tab. 5.1: CAPE-Werte nach (Barthlott, 2004):

CAPE in $J kg^{-1}$	Schichtung
<0	stabil
0 - 1000	schwach instabil
1000 - 2500	moderat instabil
2500 - 4000	sehr instabil
>4000	extrem instabil

in kinetische Energie des Luftpakets überführt wird, die maximale vertikale Geschwindigkeit  $w_{max}$  des Luftpakets abgeschätzt werden:

$$w_{max} = \sqrt{2 \cdot CAPE} . \quad [5.5]$$

Eine realistischere Abschätzung ist  $w_{max} = 0.5 \cdot \sqrt{2 \cdot CAPE}$ , da durch Hydrometeore und die Einmischung von trockener Umgebungsluft der Wert nach Gl. 5.5 nicht erreicht wird (Beheng, 2005b). Beide Effekte schwächen durch das Herabsetzen des Feuchtegehalts und Erniedrigung der Temperatur den Auftrieb.

- Convective Inhibition (CIN) ist der Gegenspieler zur CAPE und wirkt konvektionshemmend. Beide Größen müssen zusammen betrachtet werden, denn zur Auslösung von Konvektion muss die CIN erst abgebaut werden. Je größer die CIN ist, desto größer muss der synoptische Antrieb sein, um das Luftpaket bis zum NFK anzuheben (Tab. 5.2). Große Werte von CIN können auch bei großer CAPE die Auslösung von Konvektion unterdrücken. Die CIN berechnet sich aus dem Startdruck  $p_p$  des Luftpakets in Bodennähe bis zu dem Punkt, an dem das Luftpaket einen Auftrieb erhalten würde, also dem KKN oder NFK:

$$CIN = R_l \int_{p_p}^{p_B} (T_{v,p} - T_v) d \ln p . \quad [5.6]$$

Tab. 5.2: CIN-Werte nach Barthlott (2004):

CIN in $J kg^{-1}$	Kommentar
>100	Unterdrückt die Bildung von Konvektion ohne signifikante Antriebe.

Die CIN ist sehr sensitiv in der Grenzschicht auf Temperatur- und Feuchteänderungen. In einer gut durchmischten Grenzschicht haben Temperaturänderungen einen größeren Einfluß als Feuchteänderungen auf die Änderung der CIN (Trier, 2003).

- Der Lifted Index (LI), vorgeschlagen von John G. Galway (1956), berechnet den Temperaturunterschied zwischen der Temperatur ( $T_{500}$ ) der Umgebung des Luftpakets in 500 hPa Höhe und der Temperatur eines Luftpakets  $T'_{i \rightarrow 500}$ , das von seinem Ausgangspunkt zuerst trockenadiabatisch bis zur Sättigung und dann pseudoadiabatisch auf 500 hPa gehoben wird:

$$LI_i = T_{500} - T'_{i \rightarrow 500} \quad . \quad [5.7]$$

Der Lifted Index kann für jedes Luftpaket unterhalb von 500 hPa berechnet werden. Als Ausgangsniveau (Index i) wird oft der Mittelwert der untersten 50 hPa-100 hPa oder der Bodenwert ( $LI_{sfc}$ ) betrachtet. Positive Werte beschreiben eine stabile Schichtung, negative Werte eine labile Schichtung. Die Intensität der Konvektion nimmt mit zunehmenden negativen Werten zu (Tab. 5.3).

Tab. 5.3: LI-Werte nach Barthlott (2004):

$LI_{sfc}$ in $^{\circ}C$	Schichtung	Kommentar
>0	stabil	Gewitter unwahrscheinlich
0 bis -2	schwach instabil	Gewitter möglich
-3 bis -5	moderat instabil	Gewitter wahrscheinlich
<-6	sehr instabil	schwere Gewitter

- Der Showalter Index (SHOW), vorgeschlagen von Showalter (1953), berechnet sich wie der LI als Temperaturdifferenz eines Luftpakets, das von 850 hPa pseudoadiabatisch auf 500 hPa gehoben wird zur Umgebung in 500 hPa. Die Intensität der Konvektion wird ähnlich wie beim LI bewertet. Ab Werten von  $+3^{\circ}C$  können sich Gewitter entwickeln (Tab. 5.4).

$$SHOW = T_{500} - T'_{850 \rightarrow 500} \quad . \quad [5.8]$$

Tab. 5.4: SHOW-Werte nach Barthlott (2004):

SHOW in °C	Schichtung
>0	stabil, schwache Konvektion bei starker Auslösung
0 bis -4	schwach instabil
-4 bis -6	sehr instabil
<-6	extrem instabil

- Der KO-Index wurde vom DWD (1989) vorgeschlagen, um die potentielle Instabilität in der unteren und mittleren Troposphäre (850 hPa und 1000 hPa, sowie 500 hPa und 700 hPa) zu berücksichtigen:

$$KO = 0.5(\Theta_{e,500} + \Theta_{e,700}) - 0.5(\Theta_{e,850} - \Theta_{e,1000}) , \quad [5.9]$$

mit der äquivalent-potentiellen Temperatur

$$\Theta_e = \Theta \cdot \exp\left(\frac{l_{wd} r_{wd}}{c_{pl} T}\right) , \quad [5.10]$$

mit  $l_{wd}$  der Kondensationswärme in  $\text{J kg}^{-1}$ ,  $r_{wd}$  dem Mischungsverhältnis und  $c_{pl}$  der Wärmekapazität von trockener Luft. Mit Tab. 5.5 kann die Gewitterwahrscheinlichkeit mit dem KO-Index abgeschätzt werden.

Tab. 5.5: KO-Werte nach Barthlott (2004):

KO in K	Kommentar
>6	Gewitter nicht wahrscheinlich
2 bis 6	Gewitter möglich
<2	schwere Gewitter möglich

- Der Deep Convection Index (DCI), vorgeschlagen von Barlow (1993), kombiniert den Temperaturunterschied der Temperatur  $T_{850}$  und des Taupunkt  $T_{d,850}$  in 850 hPa mit dem Lifted Index mit Bodenwerten ( $LI_{sfc}$ ):

$$DCI = T_{850} - T_{d,850} - LI_{sfc} . \quad [5.11]$$

Die nachfolgende Tab. 5.6 zeigt typische Werte des DCI für die Einschätzung der Gewitterbildung und Intensität.

Tab. 5.6: DCI-Werte nach Barthlott (2004):

DCI in K	Kommentar
<10	Gewitter nicht wahrscheinlich
10 bis 20	Gewitter möglich
20 bis 30	starke Gewitter möglich
>30	schwere Gewitter möglich

Die berechneten Indizes zeigen zwischen den von den verschiedenen Sonden gemessenen Profilen kaum Unterschiede bei einem gemeinsamen Aufstieg. Bei den Abwurftests im Mai und August mit der Do-128 liegen nur Profile der Radiosondenaufstiege an der Bodenstation bis zur Abwurfhöhe von knapp über 6 km Höhe vor. Die berechneten Indizes der Aufstiegsprofile werden mit Messungen der umliegenden DWD-Radiosondenstationen Bergen und Lindenberg zwischen 00 UTC und 12 UTC verglichen.

Bei den Testabwürfen im Mai 2009 zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in den Indizes zwischen den DWD-Messungen und den Messungen in der Nähe des Truppenübungsgeländes der Bundeswehr. Der LI ist bei allen Aufstiegen  $>12\text{ °C}$ , ebenso der SHOW mit Werten um  $8\text{ °C}$ . Die Indizes zeigen eine stabile Schichtung an. CAPE und CIN werden bei den DWD Aufstiegen mit  $0.0\text{ J kg}^{-1}$  angegeben, ebenso bei den Radiosondenaufstiegen in der Nähe des Truppenübungsgeländes der Bundeswehr. Die Auslösetemperatur liegt bei etwa  $24\text{ °C}$ . Die Tageshöchsttemperatur war bei etwa  $20\text{ °C}$ . Damit konnte an diesem Tag durch aktives Aufsteigen keine Konvektion ausgelöst werden.

Im August 2009 zeigen sich ähnliche Verhältnisse wie im Mai. Die Aufstiege des DWD in Bergen und Lindenberg sowie die Aufstiege von der Bodenstation bei Magdeburg zeigen keine signifikanten Unterschiede an. Bei allen Aufstiegen werden keine Werte für CAPE und CIN angegeben, die Indizes LI und SHOW sind beide größer als  $5\text{ °C}$  und zeigen eine stabile Schichtung an. Die Auslösetemperatur liegt bei etwa  $30\text{ °C}$ , die im Tagesverlauf nicht erreicht wurde.

Bei den Tandemaufstiegen im November werden die DWD-Stationen Idar-Oberstein und Stuttgart-Schnarrenberg zum Vergleich herangezogen. Beim ersten Tandemaufstieg zeigen sich geringe Werte von CAPE und CIN, ähnlich den von den DWD-Aufstiegen berechneten Werten. Die Indizes LI ( $7\text{ °C}$  bis  $8\text{ °C}$ ) und SHOW ( $9\text{ °C}$  bis  $10\text{ °C}$ ) zeigen eine stabile Schichtung an. Konvektion wird an diesem Tag nicht ausgelöst. Zwei Tage später zeigen alle Aufstiege deutlich niedrigere Werte für LI und SHOW zwischen  $2\text{ °C}$  und  $3\text{ °C}$  und geringe Werte von CAPE bis  $20\text{ J kg}^{-1}$  und CIN bis  $-3.8\text{ J kg}^{-1}$ , die in etwa der Station Idar-Oberstein entsprechen. In Stuttgart wird keine CAPE und CIN berechnet. Die Lage der verschiedenen Kondensationsniveaus HKN, KKN, und NFK stimmen mit dem Aufstieg aus Idar-Oberstein gut überein.

Die Messungen in Lindenberg zeigen im ersten Aufstieg geringe Unterschiede beim LI und SHOW. Die Fallsonden messen eine höhere Temperatur als die Vaisala Sonde in 500 hPa, dadurch sind die

Werte für LI und SHOW um etwa 2 °C höher als die Werte der Vaisala Sonde. Aus den Aufstiegsdaten lässt sich der LI mit 9.3 °C und der SHOW mit 8.3 °C berechnen. Beide zeigen wieder eine stabile Schichtung an. Die CAPE wird mit Werten um 2 J kg<sup>-1</sup> für alle Sonden berechnet, die CIN mit 0 J kg<sup>-1</sup>.

Der dritte Aufstieg am 02.12.2009 um 00 UTC zeigt eine gute Übereinstimmung der GRAW-Sonden von LI, SHOW, KO-Index, und DCI. Die Unterschiede zur Vaisala Sonde sind nicht signifikant und gering. Der LI hat Werte um 11.5 °C, der SHOW etwa 13 °C, beide zeigen eine stabile Schichtung an.

Der vierte Aufstieg am 02.12.2009 um 12 UTC zeigt eine gute Übereinstimmung aller Sonden beim LI, SHOW und KO-Index. Der LI nimmt Werte um 12 °C, der SHOW Werte um 12 °C an. Beide zeigen eine stabile Schichtung an. Der KO-Index beträgt etwa 11 K und ist für alle Sonden sehr ähnlich. Beim DCI werden Werte zwischen -42 °C bis -55 °C berechnet. Die Abweichungen beim DCI sind durch die unterschiedlichen Feuchtemessungen in 850 hPa begründet. Alle GRAW-Sonden messen in diesem Bereich eine zu große Feuchte, die sich direkt in der Berechnung des DCI niederschlägt.

Über alle durchgeführten Aufstiege sind die Berechnungen der Indizes, in die nur die Temperatur eingeht, sehr ähnlich und weisen kaum Unterschiede auf. Geht die Feuchte mit ein, wie z.B. beim DCI zeigen sich vor allem bei den Aufstiegen in Lindenberg Unterschiede, wenn es zu größeren Abweichungen in der Feuchtemessung kommt, wie in den Aufstiegen um 00 UTC (Abb. 3.33). Alle Aufstiege wurden in einer latent stabil geschichteten Troposphäre durchgeführt. Die Werte von LI und SHOW waren stets positiv, die Werte von CAPE und CIN sehr gering. Die Auslösetemperatur im Mai und August wurde während des Tages nicht erreicht.

### 5.3 Wetterentwicklung in Lindenberg vom 01.12.2009 bis 02.12.2009

Ein stark ausgeprägter Trog liegt über Mitteleuropa und reicht bis nach Nordafrika. Über Polen liegt ein kleines Tief, in dessen Einflussbereich sich Teile Ostdeutschlands befinden (Abb. 5.2). Durch das Abziehen des Tiefs und die Trogverlagerung nach Osten kommt Mitteleuropa in den Einfluss eines Rückens mit Bodenhochdruckkeil (Abb. 5.2, 5.3 und Tab. 5.7). Kühlere Luft aus Nord und West wird heran transportiert. Druckanstieg führt zu großräumiger Auflockerung der Bewölkung (Abb. 5.4 bis 5.6). Der erste Aufstieg in Lindenberg am 01.12.2009, 12 UTC, gestartet bei leichtem Niederschlag aus einer geschlossenen Wolkendecke, zeigt ein Profil mit hohen Feuchtwerten bis 4 km Höhe (Abb. 3.27). Bis zum zweiten Start um 18 UTC bleiben die Verhältnisse in etwa gleich, der Niederschlag lässt etwas nach (Abb. 5.4). In der weiteren Entwicklung fällt nach 20 UTC kein Niederschlag mehr und die Bewölkung lockert langsam auf. Der Wind weht bodennah zunächst aus nördlichen Richtungen, oberhalb 700 hPa um ca. 180° gedreht aus südlichen Richtungen. Bodennah dreht der Wind auf nordwestliche Richtungen, während in der Höhe der Wind weiter aus südlichen Richtungen weht. Zwischen 18 UTC und 00 UTC setzt sich der Rücken in Mitteleuropa weiter durch und transportiert trockenere Luft aus Westen nach Mitteleuropa (Abb. 5.5). Im dritten Aufstieg um 00 UTC ist dieser Bereich trockener Luft in 850 hPa erstmals zu sehen (Abb. 3.33). Mit zunehmender Wolkenauflösung strahlt der Boden nachts stärker aus, die Temperatur erreicht ihren Tiefstwert von -0.1 °C vor Sonnenaufgang um 7 Uhr Ortszeit (Abb. 5.5).

Zwischen 00 UTC und 12 UTC dreht der Wind in der Höhe von südlichen Richtungen auf westliche Richtungen. Im weiteren Verlauf setzt sich zwischen 06 UTC und 12 UTC die trockene Luft durch die westlichen Winde in der gesamten Troposphäre bis fast zum Boden durch (Abb. 5.6).

Tab. 5.7: Bodenwerte in Lindenberg zwischen dem 01.12.2009, 12 UTC und dem 02.12.2009, 12 UTC:

Zeit	p in hPa	T in °C	U in %	Windr. in °	Windg. in m/s	Bedeckungsgrad
01.12.09 12:00	993.4	5.8	96	340	3	8
01.12.09 15:00	994.6	6.0	97	340	4	8
01.12.09 18:00	996.3	5.8	96	350	2	8
01.12.09 21:00	997.5	4.4	94	340	3	8
02.12.09 00:00	998.0	3.1	94	310	3	8
02.12.09 03:00	999.9	2.0	94	290	3	8
02.12.09 06:00	1000.7	0.3	96	280	2	6
02.12.09 09:00	1002.3	0.7	95	240	3	6
02.12.09 12:00	1002	2.5	85	210	2	1

Der vierte Aufstieg am 02.12.2009 12 UTC zeigt die Ausbreitung der trockenen Luft über die gesamte Troposphäre (Abb. 3.38). Die Bewölkung hat sich in Lindenberg fast vollständig aufgelöst (Tab. 5.7, Abb. 5.6). Die Temperatur erreicht am 02.12.2009 tagsüber bei Sonnenschein 3.5 °C, im Vergleich zum Vortag eine Differenz von etwa 2.5 °C (Tab. 5.7). Der Wind weht über die gesamte Troposphäre aus westlichen Richtungen.

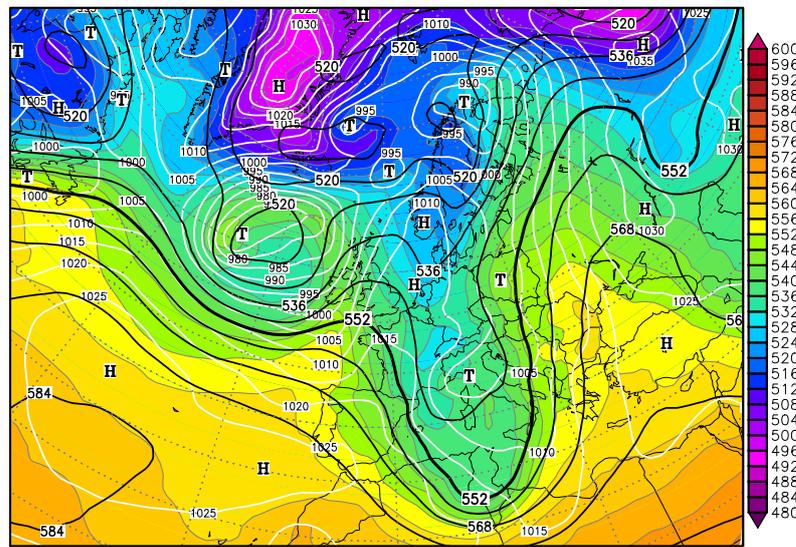


Abb. 5.2: Retop500/1000 am 01.12.2009, 12 UTC, mit Isohypsen des Geopotentials in 500 hPa in Schwarz, den Isobaren des Bodendrucks in Weiß und die Retop in Farbe.

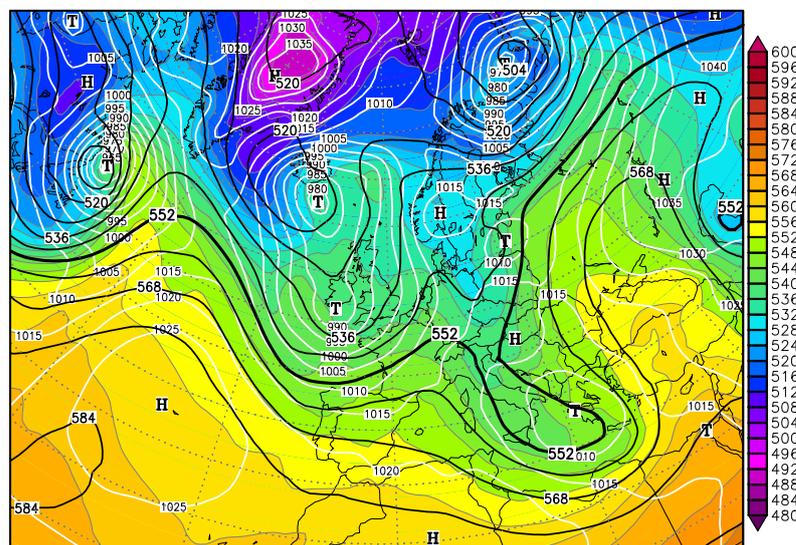


Abb. 5.3: Wie Abb. 5.2 am 02.12.2009, 12 UTC.

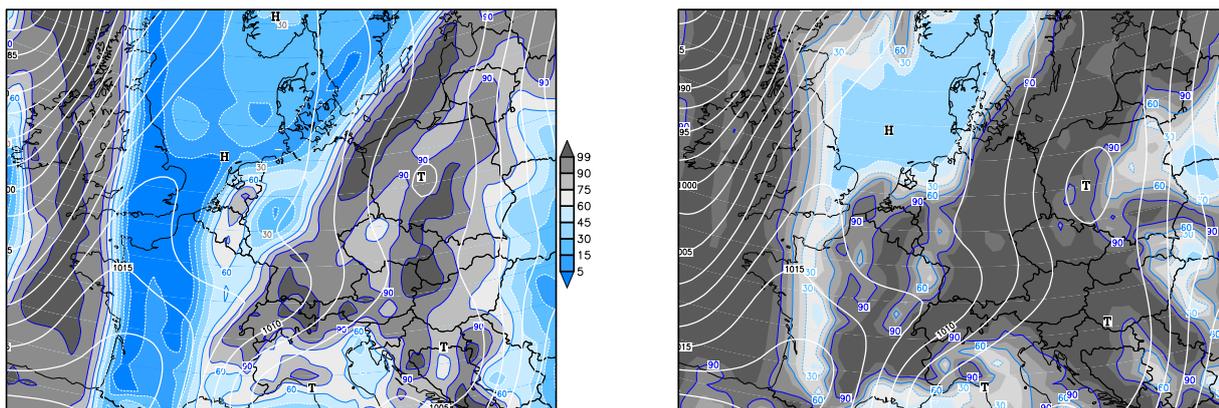


Abb. 5.4: Relative Feuchte in 700 hPa in % (links) und Gesamtbewölkung in % (rechts) am 01.12.2009, 12 UTC, mit jeweils den Isobaren des Bodendrucks in Weiß.

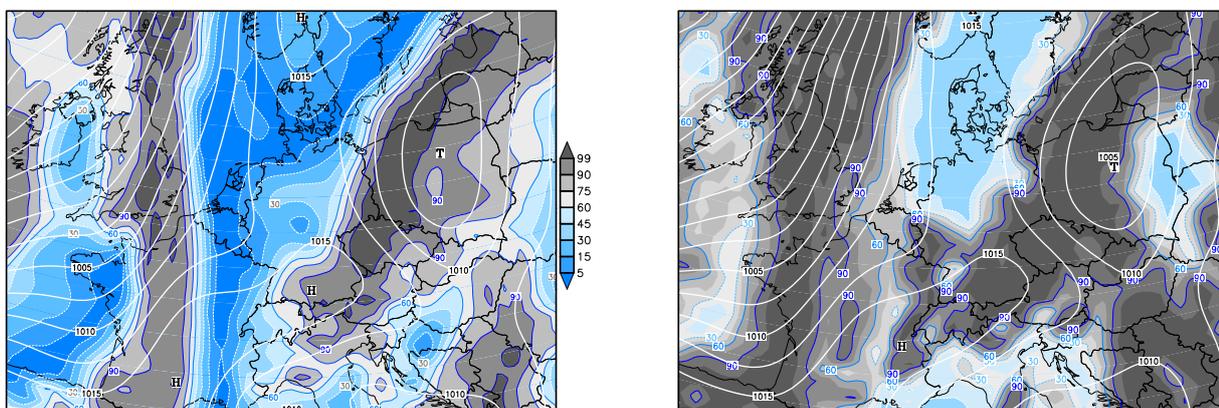


Abb. 5.5: wie Abb. 5.4 am 02.12.2009, 00 UTC.

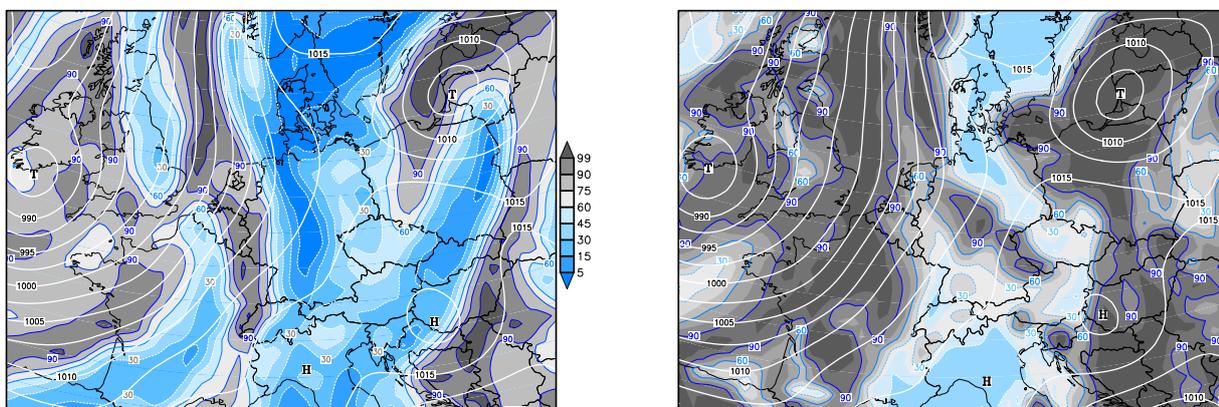


Abb. 5.6: wie Abb. 5.4 am 02.12.2009, 12 UTC.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde die neu entwickelte Fallsonde auf ihre Funktion und Genauigkeit getestet. In Labormessungen in der Klimakammer konnte die Temperaturmessung als sehr gut eingestuft werden, die Abweichungen zu den Referenzsensoren in der Kammer waren gering und innerhalb der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit des Sensors von 0.2 K. Die Fallsonden zeigten in der Klimakammer bei allen Feuchtemessungen stets einen höheren Feuchtwert, der zwischen 3 % und 5 % relative Feuchte höher war als die Referenzmessung. Dieses Ergebnis liegt innerhalb der WMO-Vorgaben. Alle GRAW-Sonden zeigen während der Labortests ein nahezu identisches Sensorverhalten bei Temperatur- und Feuchteänderungen, was auf eine gleichmäßige Kalibrierung durch den Hersteller schließen lässt. Die Temperaturunterschiede der GRAW-Sonden untereinander sind gering und vernachlässigbar. Die Kalibrierung der Feuchtesensoren zeigt geringe Unterschiede, da die mittlere Abweichung von der Referenz sich von Sonde zu Sonde unterscheiden kann (zwischen 3 % und 5 % relative Feuchte). Eine Überprüfung der Kalibrierung der Feuchtesensoren könnte hier die Abweichungen von der Referenz reduzieren.

In Vergleichsaufstiegen mit der bisherigen Karlsruher Fallsonde zeigten sich größere Unterschiede bei der Temperatur- und Feuchtemessung vor allem ab etwa 6 km Höhe. Durch die Wärmeabgabe des Taupunktspiegelhygrometers wird die Temperaturmessung der Karlsruher Fallsonde allerdings beim Aufstieg beeinflusst. Während des Falls waren die Abweichungen geringer. Die Feuchtemessung stimmt im Verlauf meist gut überein, wobei die Absolutwerte aber zum Teil um mehr als 10 % relative Feuchte auseinander liegen. Vergleiche mit Radiosondenstationen des DWD aus Idar-Oberstein und Stuttgart-Schnarrenberg zeigen eine gute Übereinstimmung der gemessenen Profile der neuen Fallsonden mit den DWD-Messungen.

Die Vergleichsmessungen mit der Vaisala RS92 Radiosonde, die am Richard-Assmann-Observatorium des DWD in Lindenberg durchgeführt wurden, zeigten ebenfalls eine gute Übereinstimmung bei der Temperaturmessung. Die aufgetretenen Abweichungen zwischen der neuen Fallsonde und der Vaisala Sonde sind im allgemeinen stets kleiner als 0.5 K. Die Feuchtemessung zeigte dagegen zum Teil deutliche Unterschiede. Vor allem dann, wenn der Feuchtesensor durch Niederschlag oder bei einem Durchflug von Wolken benetzt oder bereift war. Der Sensor der neuen Fallsonde reagierte dann träger und schwächer auf große Änderungen in der Feuchte. Ist der Feuchtesensor frei von Kontamination durch Wasser oder Eis, kann der Sensor dagegen seine Leistungsfähigkeit zeigen. Große Feuchteänderungen werden in diesem Fall genauso gut wie von der Vaisala Sonde wiedergegeben, wobei geringe Abweichungen im Absolutwert auftreten. Bei den Vergleichsmessungen konnte bei den Fallprofilen, nach einem Wolken-

durchflug der Wet-Bulb-Effekt bei der Temperatur- und Feuchtemessung beobachtet werden. Gerade das Verhalten des Feuchtesensors beim Bereifen muss in Rücksprache mit dem Hersteller GRAW besser verstanden werden. Bislange sind die Sensoren nicht gegen Anlagerung von Tropfen, Benetzen oder Bereifen geschützt. Eine Änderung des Designs des Gehäuses der Fallsonde kann in diesem Punkt zu deutlichen Verbesserungen führen.

Zum Abwurf aus dem Flugzeug wurden bei mehreren Testabwürfen der Abwurfbehälter und dessen Öffnungsmechanismus getestet und verbessert und schließlich bei zwei Testabwürfen aus 6 km Höhe mit der Do-128 des IFF der Technischen Universität Braunschweig im Mai und August 2009 erfolgreich getestet. Die Empfangsanlage und eingesetzten Empfänger waren für diesen Testaufbau gut geeignet. Die Speicherung und Decodierung der Daten funktionierte sehr gut für zwei gleichzeitig aktive Sonden. Die gemessenen Daten der Fallsonden stimmten mit den Messungen der Bordmessanlage der Do-128 sowie den Radiosondenaufstiegen an der Bodenstation gut überein. Die auftretenden Temperaturunterschiede sind gering, der Feuchtesensor konnte den schnellen Änderungen der Feuchte gut folgen. Die Separierung der Sonden konnte in beiden Abwurftests nicht ausreichend beurteilt werden, da die Fallgeschwindigkeiten zu unterschiedlich waren. Die Bergung der Fallsonden im August zeigte Beschädigungen an den Sondenfallschirmen, die die großen Unterschiede in der Fallgeschwindigkeit erklären.

Die weitere Planung sieht vor, das Fallsondensystem auf einem hoch und schnell fliegenden Flugzeug im April/Mai 2010 zu testen und bei der Demomission NEPTUN erstmals auf der HALO einzusetzen.

## A Literaturverzeichnis

- Barthlott, C. (2004). Konvektionsindices - Berechnung sowie Darstellung im Stueve-Diagramm .
- Beheng, K. (2005a). Dynamik der Atmosphäre - Skriptum zur Vorlesung WS 04/05 .
- Beheng, K. (2005b). Thermodynamik und Statik der Atmosphäre - Skriptum zur Vorlesung SS 2005 .
- da Silveira, R., G. Fish, L. Machado, A. Dall'Antonia, L. Sapucci, D. Fernandes und R. Marques (2006). WMO Intercomparison of GPS radiosondes. Alcantara, Brazil, 2001. *WMO/TD-No.1314 Instruments and Observing Methods Report No. 90* [http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-90\\_RSO\\_EMA\\_Alcantara2001.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-90_RSO_EMA_Alcantara2001.pdf).
- DLR (2001). HALO - Antrag auf Beschaffung und Betrieb eines Forschungsflugzeuges für die Atmosphärenforschung und Erdbeobachtung [http://www.halo.dlr.de/scope/download/Neu\\_HALO\\_Antrag\\_Februar\\_2001\\_final2.pdf](http://www.halo.dlr.de/scope/download/Neu_HALO_Antrag_Februar_2001_final2.pdf).
- Franklin, J. L. und T. F. Hock (1999). The NCAR Dropwindsonde. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 80, 407–420.
- Haklander, M. J. und A. V. Delden (2003). Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands. *Atmos. Res.* 67-68, 273–299.
- Huntrieser, H., H. Schiesser, W. Schmid und A. Waldvogel (1996). Comparison of Traditional and Newly Developed Thunderstorm Indices for Switzerland. *Wea. Forecasting* 12, 108–125.
- Immler, F. (2009). Report on the LUAMI Campaign Fall 2008 , not published.
- Jeannot, P., C. Bower und B. Calpini (2008). Global Criteria for Tracing the Improvements of Radiosondes over the last Decades. *WMO/TD-No.1433 Instruments and Observing Methods Report No. 95* [http://www.wmo.ch/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO\\_IOM/Tracing-improv\\_last-decades.pdf](http://www.wmo.ch/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO_IOM/Tracing-improv_last-decades.pdf).
- Kottmeier, C., T. Reetz, P. Ruppert und N. Kalthoff (2001). A New Aerological Sonde for Dense Meteorological Soundings. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 18, 1495–1502.
- Kunz, M. (2007). The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 7, 327–342.
- Mori, Y. (1986). Evaluation of Several Single-Pass Estimators of the Mean and the Standard Deviation of Wind Direction. *J. Climate Appl. Meteor.* 25, 1387–1397.

- Nash, J., R. Smout, T. Oakley, B. Pathack und S. Kurnosenko (2006). WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems. Vacaos, Mauritius, 2005 Final Report. *WMO/TD-No.1303 Instruments and Observing Methods Report No. 83* [http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/intercomparisons/RS0-2005/RS0-IC-2005\\_Final\\_Report.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/intercomparisons/RS0-2005/RS0-IC-2005_Final_Report.pdf).
- Pichler, H. (1997). *Dynamik der Atmosphäre 3. Auflage*. Spektrum Akademischer Verlag.
- Poulos, G. S., J. Wang, D. K. Lautitsen und H. L. Cole (2006). Targeted Dropwindsondes in Complex Terrain. *Notes and Correspondence* , 1489–1494.
- Richner, H., J. Joss und P. Ruppert (1996). A water hypsometer utilizing high precision thermocouples. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 13, 175–182.
- Ruppert, P. (1991). Hypsometer having controlled heating, particularly for use in meteorological radiosondes , U.S. Patent No. 5048337.
- Trier, S. B. (2003). *Convective Initiation on Encyclopedia of Atmospheric Sciences 2nd Edition*, Bd. 2. Academic Press.
- Vaisala (2009). Vaisala RD93 Dropsonde [http://www.vaisala.com/files/RD93\\_Dropsonde\\_Datasheet\\_eng.pdf](http://www.vaisala.com/files/RD93_Dropsonde_Datasheet_eng.pdf).
- Wang, J. (2005). Evaluation of the Dropsonde Humidity Sensor Using Data from DYCOMS-II and IHOP 2002. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 22, 247–257.
- WMO (2008). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation 7th Edition [http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO\\_Guide-7th\\_Edition-2008.html](http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.html).
- Young, K., J. Wang und B. Arensdorf (2009). Consistent Quality Control of 13-year (1996-2008) High Resolution GPS Dropsonde Data Set for Hurricane Research. *Proceedings of the 8th International Symposium on Tropospheric Profiling* <http://cerberus.rivm.nl/ISTP/data/1656262.pdf>.





## Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. Kottmeier bedanken für die Ermöglichung meiner Diplomarbeit und bei Herrn Prof. Dr. Beheng für die Übernahme des Koreferats.

Ich möchte mich bei meinem Betreuer Andreas Wieser bedanken, für die aufgewendete Zeit, Anregungen und Tipps rund um meine Arbeit. Ebenso gilt mein Dank Ulrich Corsmeier und der gesamten Arbeitsgruppe für die Unterstützung und angenehme Atmosphäre. Ganz besonders möchte ich mich bei Holger Mahlke bedanken, der mir die Verwendung der Wetterkarten von [wetter3.de](http://wetter3.de) ermöglichte und für sein offenes Ohr, Diskussionen und Durchführung rund um die Tandemaufstiege vom KIT Campus Nord. Gleichmaßen gilt mein Dank Christian Barthlott, der mir die Verwendung seines Kyss-Programms ermöglichte.

Für die Unterstützung bei den Messungen möchte ich mich bei Martin Kohler, Stefan Kraut und Jürgen Lenfant bedanken, die mir mit Rat und Tat beiseite standen, ebenso bei den Mitarbeitern der Institutswerkstatt.

Mein Dank gilt der Firma enviscope, GRAW, der Crew der Do-128 D-IBUF und den Mitarbeitern des DWD in Lindenberg für die gute Zusammenarbeit bei der Entwicklung, den Testflügen und Vergleichsaufstiegen.

Meinen Wegbegleitern während des Studiums und den Kolleginnen und Kollegen im Diplomandenraum danke ich für die schöne Zeit. Allen Korrekturlesern meiner Arbeit ein großes Dankeschön für eure aufgewendete Zeit und Tipps.

Ich möchte mich ganz besonders bei meinem Vater bedanken, der mich während meiner Studienzeit unterstützt hat. Bei meiner Freundin möchte ich mich bedanken für ihr Verständnis und Unterstützung in der turbulenten Zeit am Ende meiner Arbeit.



## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbst verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Ich bin damit einverstanden, dass diese Arbeit in Bibliotheken eingestellt wird und vervielfältigt werden darf.

Karlsruhe, den 01. März 2010

Daniel Fütterer