

BACHELORARBEIT

**Wolken über dem Nordatlantik:
Vergleich von flugzeuggetragenen
Messungen eines Lidars, Wolkenradars
und Mikrowellenradiometers während
NARVAL-Nord**

von

Nicole Albern

30. September 2014

Erstgutachter: Prof. Dr. Felix Ament

Zweitgutachter: Dr. Christian Klepp

Studiengang Meteorologie

MIN-Fakultät

Universität Hamburg

Thema der Arbeit: Wolken über dem Nordatlantik: Vergleich von flugzeuggetragenen Messungen eines DIALs, Wolkenradars und Mikrowellenradiometers während NARVAL-Nord

Kurzfassung

Während der NARVAL-Nord Kampagne waren unter anderem ein Radar, ein DIAL und mehrere Mikrowellenradiometermodule an Bord des Forschungsflugzeuges HALO montiert. Während der fünf Forschungsflüge, die im Januar 2014 im nördlichen Nordatlantik durchgeführt wurden, um postfrontale Konvektion auf der Rückseite von Tiefdruckgebieten zu untersuchen, wurde eine große Vielfalt an Wolkenregimen überflogen. In dieser Arbeit soll untersucht werden, wie gut die verwendeten Messgeräte in der Detektion dieser Wolken übereinstimmen. Hierzu werden die Messungen im Hinblick auf die Wolkenhäufigkeit und die Wolkenoberkante untersucht. Die Analysen werden sowohl im Mittel über die einzelnen Forschungsflüge, als auch im Mittel über einzelne Flugabschnitte und anhand eines Fallbeispiels durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
1 Einleitung	1
2 Messgeräte und Daten	4
2.1 Das Forschungsflugzeug HALO	4
2.2 Das HALO Microwave Package (HAMP)	5
2.2.1 Mikrowellenradiometer	6
2.2.2 Wolkenradar MIRA-36	7
2.3 Das Lidar WALES	7
2.4 Methoden der Datenauswertung	8
3 Ergebnisse des Instrumentenvergleiches	14
3.1 Die fünf Forschungsflüge	14
3.2 Der dritte Forschungsflug vom 18.01.2014	19
3.3 Fallstudie an einem Cumulonimbus vom 12.01.2014	25
4 Zusammenfassung und Ausblick	30
Danksagung	32
Literaturverzeichnis	33
Erklärung	35

Abbildungsverzeichnis

2.1	Messgeräte unter dem Rumpf von HALO.	5
2.2	Zeitreihe der gemessenen Radarreflektivität für einen 90 minütigen Zeitraum während des dritten Forschungsfluges vom 18.01.2014.	12
3.1	Prozentuale Wolkenhäufigkeit der vier untersuchten Messgeräte aufgetragen für die fünf Forschungsflüge und im Mittel über alle Flüge.	15
3.2	Mittel über die oberste Wolkenoberkante des Radars und des Lidars aufgetragen für die fünf Forschungsflüge und im Mittel über alle Flüge.	18
3.3	Anzahl der Messungen, in denen die Radarwolke über der Lidarwolke oder die Lidarwolke über der Radarwolke beginnt, sowie in denen sich die Wolkenoberkante in der gleichen Höhe befindet.	19
3.4	Profilmessung der Radarreflektivität (oben) und des logarithmisch aufgetragenen Rückstreuverhältnisses des Lidars (unten) unterteilt in die fünf untersuchten Flugabschnitte des dritten Forschungsfluges.	20
3.5	Höhe der mittleren Wolkenoberkante während der fünf Flugabschnitte und im Mittel über die fünf Abschnitte.	21
3.6	Anzahl der Messungen, in denen während der fünf untersuchten Flugabschnitte die Radarwolke über der Lidarwolke beziehungsweise die Lidarwolke über der Radarwolke beginnt, sowie in denen sich die Wolkenoberkante beider Geräte in der gleichen Höhe befindet.	23
3.7	Wolkenhäufigkeiten der vier untersuchten Messgeräte aufgetragen für die fünf Flugabschnitte und im Mittel über alle Abschnitte (oben), sowie die Wolkenhäufigkeit des Radars und des Lidars aufgeteilt in tiefe Wolken und Wolken, die sich über mehrere Stockwerke erstrecken (unten).	24
3.8	Während des dritten Forschungsfluges aufgenommenes Foto, das 4 km hohe Cumulonimben zeigt, die während des vierten Flugabschnittes überflogen wurden.	26

3.9	Profil der Radarreflektivität (oben links) und des logarithmisch aufgetragenen Rückstreuverhältnisses des Lidars (unten links), sowie die Zeitreihen der gemessenen Helligkeitstemperaturen der untersuchten Mikrowellenradiometerkanäle (HALO-11990, oben rechts; HALO-KV, unten rechts) für den untersuchten Cumulonimbus. Die weißen Balken in den Profilen stellen die Sekunden dar, in denen keine zeitgleichen Messungen von allen vier untersuchten Geräten vorliegen.	27
3.10	Vergleich der gemessenen Wolkenoberkante des Radars und des Lidars. . .	28
3.11	Wolkenhäufigkeit für die vier untersuchten Messgeräte.	29

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht über die Termine der fünf Forschungsflüge mit ihrer jeweiligen Flugnummer und den geflogenen Flugflächen. FL270 entspricht einer Flughöhe von etwa 8 km und FL430 von etwa 13 km. Angegeben ist zudem die Dauer der einzelnen Forschungsflüge und deren Thematik.	14
3.2	Kontingenztabellen für die fünf Forschungsflüge und alle möglichen Gerätekombinationen.	16
3.3	Übersicht über die wichtigsten Merkmale der fünf untersuchten Flugabschnitte.	21

Kapitel 1

Einleitung

Wolken und Niederschlag spielen eine wichtige Rolle im Wasser- und Energiekreislauf des Klimasystems und beeinflussen maßgeblich die Strahlungsbilanz der Erde (Rosen et al., 2007). Aus diesem Grund ist das Verständnis der Prozesse, die zur Wolkenbildung und -entwicklung führen von großem Interesse. Diese Prozesse sind bisher noch nicht ausreichend verstanden und bedürfen weiteren unter anderem experimentellen Untersuchungen. Denn nur wenn die Wolkenprozesse besser verstanden sind, ist es möglich, den Unsicherheitsfaktor der Wolken in der Klimamodellierung und in der Klimavorhersage zu reduzieren (Stevens und Bony, 2013).

Für eine globale Abdeckung mit Messdaten sind Satelliten essenziell. Die Qualität der Daten, die in einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung vorliegen, ist jedoch noch unsicher, sodass eine Validierung der Daten erforderlich ist. Vor allem über den Ozeanen existieren allerdings kaum in-situ oder Fernerkundungsmessungen, die zur Validierung eingesetzt werden können. Um diese Datenlücke zu schließen sind Messkampagnen wichtig, obwohl sie meist nur ein relativ kleines Gebiet und kurze Zeitperioden abdecken. Messkampagnen, bei denen Flugzeuge eingesetzt werden, sind besonders hilfreich bei der Evaluierung und Validierung der Satellitendaten, da auf Flugzeugen ähnliche Instrumente wie auf Satelliten installiert werden können. Eine dieser Kampagnen ist die **N**ext-generation **A**ircraft **R**emote-Sensing for **V**alidation Studies (NAVRAL) Kampagne, die ein gemeinsames Projekt der Universität Hamburg, des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt, der Universität zu Köln, der Universität Leipzig, des Forschungszentrums Jülich und der Universität Heidelberg darstellt (Stevens et al., 2010). Diese Kampagne wurde im Dezember 2013 über dem südlichen Nordatlantik durchgeführt, um die Struktur der winterlichen Passatwindbewölkung zu untersuchen (NARVAL-Süd). In einem zweiten Kampagnenteil im Januar 2014 wurden die postfronta-

len Regionen auf der Rückseite von Tiefdruckgebieten über dem nördlichen Nordatlantik erforscht (NARVAL-Nord).

Postfrontale Konvektion und der damit verbundene Niederschlag in den kalten Luftmassen auf der Rückseite von Zyklonen wird von Müsse (2012) in drei Kategorien eingeteilt. Hierbei handelt es sich zum einen um postfrontale Tiefdruckgebiete mit einem von der Front der Zyklone abgelösten Niederschlagsgebiet. Des Weiteren werden Gebiete mit konvektiven Cumuli, die von der Zyklone gelöst sind und sich in offenen oder geschlossenen Zellstrukturen im Niederschlagsgebiet anordnen, sowie hakenförmige Okklusionen unterschieden, die mit der Zyklone verbunden und durch starke Niederschläge geprägt sind. Diese Formen der postfrontalen Konvektion wurden bis vor einigen Jahren nicht vom Modell des **E**uropäischen **Z**entrums für **m**ittelfristige **W**ettervorhersage (EZMW) erfasst (Klepp et al., 2005) und sind noch heute in den meisten Satellitenklimatologien nicht enthalten. Das Erkennen und korrekte Vorhersagen der konvektiv geprägten und niederschlagsreichen Rückseiten ist jedoch entscheidend, da sie den europäischen Kontinent erreichen und dort intensive Wettererscheinungen verursachen können. In der Satellitenklimatologie **H**amburg **O**cean **A**tmosphere **P**arameters and Fluxes from **S**atellite **D**ata (HOAPS) (Andersson et al., 2010) ist die postfrontale Konvektion deutlich im Niederschlag zu erkennen. Dieser Datensatz verwendet Daten der polarumlaufenden passiven Mikrowellenradiometer **S**pecial **S**ensor **M**icrowave/**I**mager (SSM/I) und **A**dvanced **V**ery **H**igh **R**esolution **R**adiometer (AVHRR). Da diese Instrumente in 830 km Entfernung zur Erde operieren, weist der Datensatz lediglich eine räumliche Auflösung von 50 km pro Pixel auf, sodass kleinräumigere Prozesse nicht aufgelöst werden können.

Klepp et al. (2003) fanden heraus, dass die postfrontale Konvektion im nordhemisphärischen Winter alle drei Tage im Ausstrom der Labradorsee zwischen der Labrador-Halbinsel und Grönland auftreten kann. Dies wurde bereits während der FASTEX (**F**ronts and **A**tlantic **S**torm-**T**rack **E**xperiment) Kampagne im Januar und Februar 1997 untersucht, bei der zusätzlich Schiffsmessungen zur Verfügung standen. Mithilfe der Ereignisse postfrontaler Konvektion, die im Zeitraum von 1989 bis 2006 in der HOAPS-Klimatologie enthalten sind, spezifizierte Müsse (2012) die Lage der Ereignisse auf das Gebiet in der Nähe von 50°N und 40°W. Um eine weitere Quantifizierung der Ereignisse zu ermöglichen, wurde die NARVAL-Nord Kampagne im Ausstrom der Labradorsee initiiert. Hierzu wurden an Bord des Forschungsflugzeugs HALO (**H**igh **A**ltitude and **L**ong **R**ange **R**esearch **A**ircraft) aktive und passive Fernerkundungsmessgeräte installiert, um die Rückseiten der winterlichen Tiefdruckgebiete über dem Nordatlantik in fünf Forschungsflügen zu erforschen (Klepp und Bakan, 2014). Bei diesen Geräten handelt es sich um ein Wolkenradar,

ein Mikrowellenradiometersystem, ein Wasserdampf DIAL und zwei Spektrometersysteme, die zur Bestimmung von Treibhausgasen in der Atmosphäre (mini-DOAS) beziehungsweise zur Messung der Strahlungsflussdichten und Strahldichten (HALO-SR) eingesetzt werden. Außerdem wurden während der Forschungsflüge Dropsonden aus dem Flugzeug abgeworfen, die ähnliche atmosphärische Parameter messen wie Radiosonden.

Um die während der Messkampagne aufgezeichneten Daten zur Evaluierung und Validierung von Satellitendaten verwenden zu können, ist es notwendig, zunächst die während der Kampagne eingesetzten Instrumente untereinander zu vergleichen. Das Wolkenradar, die Mikrowellenradiometer und das Wasserdampf DIAL können unter anderem zur Fernerkundung von Wolken genutzt werden. In dieser Arbeit wird untersucht, wie häufig die Instrumente Wolken während der fünf Forschungsflüge registriert haben. Für das Radar und das DIAL werden zudem die Höhe der Wolkenoberkante verglichen und die Messungen in verschiedene Wolkenstockwerke aufgeteilt. Im nächsten Kapitel werden die unterschiedlichen Messinstrumente und die Daten detaillierter beschrieben. Im dritten Kapitel erfolgt eine Darstellung der Ergebnisse des Instrumentenvergleiches. Dieser wird sowohl anhand aller fünf Forschungsflüge als auch im Mittel über einzelne Flugabschnitte und an einem Fallbeispiel durchgeführt. Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick über weitere mögliche Auswertungsschritte der Daten gegeben.

Kapitel 2

Messgeräte und Daten

In diesem Kapitel wird zunächst das Forschungsflugzeug HALO vorgestellt (Kapitel 2.1). Anschließend werden die für diese Arbeit verwendeten Messinstrumente erläutert, die während der NARVAL Kampagne auf HALO installiert waren, um einen Überblick über ihre jeweilige Funktionsweise zu erhalten. Bei den Geräten handelt es sich zum einen um das HALO Microwave Package (Kapitel 2.2), bestehend aus Mikrowellenradiometern und einem Wolkenradar, und zum anderen um ein Multiwellenlängen Wasserdampf-Differential-Absorptions-Lidar (Kapitel 2.3). Im darauffolgenden vierten Unterkapitel werden die verwendeten Daten erläutert und es wird auf die Methoden der Datenauswertung eingegangen.

2.1 Das Forschungsflugzeug HALO

Das **H**igh **A**ltitude and **L**ong **R**ange **R**esearch **A**ircraft (HALO) basiert auf einer zweistrahligen Gulfstream G550. Das Geschäftsreiseflugzeug, das für die Atmosphärenforschung und die Beobachtung der Erdoberfläche umgerüstet wurde, wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betrieben und unter anderem durch die Max-Planck-Gesellschaft und die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanziert.

Mit einer Reichweite von mehr als 10000 km oder mehr als 10 Flugstunden und einer Flughöhe von bis zu 15 km ist HALO in der Lage, weiter und höher zu fliegen als die meisten genutzten Forschungsflugzeuge. Dies ermöglicht beispielsweise die Erforschung der gesamten Troposphäre und der unteren Stratosphäre auf planetarer Skala (Ziereis und Gläbber, 2006). Aufgrund der niedrigeren Flughöhe im Vergleich zu Satelliten liefern die Messinstrumente an Bord von HALO räumlich höher aufgelöste Ergebnisse als vergleichbare Messinstrumente im Weltall und ermöglichen eine Validierung der Satellitenmessungen. Aus diesen Gründen wurde HALO für die NARVAL Kampagne als For-

2.2. Das HALO Microwave Package (HAMP)

schungsplattform ausgewählt. Weitere Informationen zum Flugzeug können der HALO-Homepage (www.halo.dlr.de) entnommen werden, die unter anderem einen Überblick über die Standardinstrumentierung und die wissenschaftlichen Ziele von HALO, sowie die Partnerinstitute liefert.

2.2 Das HALO Microwave Package (HAMP)

Das **HALO Microwave Package (HAMP)** wurde unter Zusammenarbeit des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, der Universität Hamburg, des DLRs, der Universität zu Köln, der Meteorologischen Messtechnik GmbH und der Radiometer Physics GmbH entwickelt und stellt eine fortschrittliche Einheit von Messgeräten zur Fernerkundung von Wolken dar (Mech et al., 2014). Es setzt sich aus zwei im Mikrowellenbereich sondierenden Fernerkundungssystemen zusammen, die jeweils senkrecht nach unten messen. Hierbei handelt es sich zum einen um drei passiv messende Mikrowellenradiometermodule (Kapitel 2.2.1) und zum anderen um ein aktiv messendes Wolkenradar (Kapitel 2.2.2). Die Antennen dieser Geräte waren für die Dauer der NARVAL Kampagne vor den Tragflächen von HALO unter dem Rumpf im sogenannten Belypod montiert (Abbildung 2.1) und während der Flüge durch eine Abdeckung aus mehrlagigen Kohlenstofffasern vor Umgebungseinflüssen geschützt, die die Messungen kaum bis gar nicht beeinträchtigt.



Abbildung 2.1: Messgeräte unter dem Rumpf von HALO. Zu sehen sind die drei Mikrowellenradiometermodule (links), das Sichtfenster des Lidars (Mitte) und das Wolkenradar (rechts) (Quelle: Friedhelm Jansen, Max-Planck-Institut für Meteorologie).

2.2.1 Mikrowellenradiometer

Mikrowellen werden von zahlreichen atmosphärischen Gasen wie Wasserdampf und Sauerstoff, aber auch von flüssigem Wasser emittiert. Bei größeren Partikeln wie Niederschlag oder Eis und bei hochfrequenten Mikrowellen müssen zusätzlich Streueffekte berücksichtigt werden, die mit der Frequenz zunehmen. Bei Wolkentröpfchen mit einem Radius von weniger als $10\ \mu\text{m}$ sind diese Effekte vernachlässigbar, da die Partikel in diesem Fall klein gegenüber der Wellenlänge sind. Gleichzeitig können Mikrowellen Wolken und Regen durchdringen, da kondensiertes Wasser semitransparent für Mikrowellenstrahlung ist. Aus diesem Grund sind sowohl bodengebundene als auch auf Satelliten installierte Mikrowellenradiometer für die Erforschung der bewölkten Atmosphäre geeignet (Crewell et al., 2011). Aus Radiometermessungen können einige Atmosphärenparameter abgeleitet werden. Hierbei handelt es sich um den vertikal integrierten Wasserdampfgehalt (Integrated Water Vapor, I WV) und den Flüssigwassergehalt der Atmosphäre (Liquid Water Path, LWP).

Das Mikrowellenradiometersystem, das während der NARVAL Kampagne an Bord von HALO installiert war, wurde für die Kampagne von der deutschen Radiometer Physics GmbH (RPG) entwickelt und gehört dem Max-Planck-Institut für Meteorologie. Das System besteht aus drei Modulen, die insgesamt mit 26 Frequenzen in fünf Banden zwischen 22,24 GHz und 195,81 GHz messen. Jedes Modul hat eine Größe von etwa $46 \times 56 \times 54\ \text{cm}^3$ und ein Gewicht von rund 60 kg (Rose, 2009). Die Frequenzen, bei denen die einzelnen Module operieren, wurden so gewählt, dass sie die Bereiche des Mikrowellenspektrums abdecken, die bei sich bereits in Betrieb befindlichen und zukünftigen Satellitenmissionen gewählt wurden. Bei den auf diesen Missionen eingesetzten Instrumenten handelt es sich beispielsweise um die **A**dvanced **M**icrowave **S**ounding **U**nit (AMSU-A und B), das **A**dvanced **M**icrowave **S**canning **R**adiometer - **E**OS (AMSR-E), den **S**pecial **S**ensor **M**icrowave/**I**mager (SSM/I), den **M**icrowave **H**umidity **S**ounder (MHS) oder den **G**PM **M**icrowave **I**mager (GMI) (Mech et al., 2014).

Das erste Radiometermodul besteht aus zwei unabhängigen Empfangseinheiten mit parallelen Antennenachsen. Eine der beiden Empfangseinheiten hat sieben Kanäle im K-Band bei 22 bis 32 GHz und operiert somit sowohl im Zentrum als auch am Rand der schwachen Wasserdampfabsorptionslinie bei 22,24 GHz. Die zweite Einheit misst im V-Band entlang der 60 GHz Sauerstoffabsorptionslinie bei 51 bis 59 GHz und weist ebenfalls sieben Kanäle auf. Nachfolgend wird dieses Modul als HALO-KV bezeichnet. Das zweite Modul, das nachfolgend als HALO-11990 bezeichnet wird, besteht wie das erste

Modul aus zwei unabhängigen Empfangseinheiten mit parallelen Antennenachsen. Eine der beiden Empfangseinheiten operiert im Fensterkanal bei 90 GHz, wohingegen die zweite Empfangseinheit entlang der 118,75 GHz Sauerstofflinie misst (F-Band). Oberhalb von 120 GHz wird die Absorption durch Wasserdampf wieder dominanter, sodass das dritte Modul HALO-183 mit sieben Kanälen entlang der 183,31 GHz Wasserdampflinie eingesetzt wird. Weitere technische Details zu den Mikrowellenradiometersystemen können Rose (2009) entnommen werden.

2.2.2 Wolkenradar MIRA-36

Das Wolkenradar MIRA-36 ist ein gepulstes Doppler-Radar. Das aktive Fernerkundungsgerät, das gebündelte elektromagnetische Wellen bei einer Frequenz von 35,5 GHz aussendet, gehört der Universität Hamburg und wurde von der Firma METEK (Meteorologische Messtechnik GmbH) hergestellt. Mech et al. (2014) beschreiben es als das erste flugzeuggetragene Ka-Band Doppler-Radar. Ein maßgeblicher Vorteil der gewählten Frequenz gegenüber dem gebräuchlicheren 94 GHz Kanal im W-Band, bei dem beispielsweise das Cloud Profiling Radar an Bord von CloudSat operiert, ist die reduzierte Dämpfung des Signals durch Kondenswasser. Ein Nachteil der genutzten Frequenz ist, dass sie eine Antenne von einem Meter Durchmesser benötigt. Da der Bellypod Maße von etwa 700 x 120 x 90 cm (Länge x Breite x Höhe) aufweist, stellt dies an Bord von HALO kein Problem dar.

Neben der Radarreflektivität, die für die nachfolgenden Auswertungen analysiert wird, liefert das Radar ein Dopplerspektrum, die Dopplergeschwindigkeit, die Spektralbreite und das lineare Depolarisationsverhältnis als Ausgabeparameter. Im Vergleich zu bodengebundenen Radaren wird die Dopplergeschwindigkeit durch zwei zusätzliche Effekte beeinflusst. Hierbei handelt es sich zum einen um den Beitrag der Flugzeuggeschwindigkeit zur mittleren Dopplergeschwindigkeit und zum anderen um die Tatsache, dass der Anstellwinkel im Steig- und Sinkflug und der Rollwinkel in Flugkurven variieren und das Messgerät demnach nicht immer exakt senkrecht nach unten misst (Mech et al., 2014).

2.3 Das Lidar WALES

Das dritte Messgerät, dessen Daten für diese Arbeit verwendet werden, ist das vom DLR betriebene Multiwellenlängen Wasserdampf-Differential-Absorptions-Lidar (DIAL) WALES (**W**ater **V**apor **L**idar **E**xperiment in **S**pace). Wie das Radar ist auch das Lidar ein

aktives Fernerkundungsgerät. Das Prinzip des DIALs basiert darauf, dass abwechselnd kurze Laserpulse bei zwei verschiedenen Wellenlängen entlang einer Wasserdampfabsorptionslinie ausgesendet und als gestreutes Licht wieder empfangen werden. Die beiden Wellenlängen werden so gewählt, dass eine im Zentrum der Absorptionslinie liegt und stark vom Wasserdampf absorbiert wird (Online-Wellenlänge), wohingegen die zweite, am Rand der Absorptionslinie liegende Wellenlänge schwach oder gar nicht absorbiert wird (Offline-Wellenlänge). Da sich die zurück gestreuten Signale der beiden Wellenlängen aufgrund der unterschiedlich starken Absorption durch den in der Atmosphäre befindlichen Wasserdampf unterscheiden, wird von „differentieller Absorption“ gesprochen (Behrendt und Wulfmeyer, 2011). Aus der Differenz der beiden Signale kann anschließend die Wasserdampfkonzentration bestimmt werden. Zudem können aus Lidarmessungen Aerosol- und Wolkeneigenschaften, sowie die Konzentration weiterer Spurengase wie beispielsweise Ozon mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung abgeleitet werden. Des Weiteren ist die Messung von Temperatur, Feuchte und Wind möglich. Das Messsystem erreicht seine Grenzen, sobald die atmosphärische Transmission zu gering wird. Aus diesem Grund sind in oder unter optisch dichten Wolken keine Messungen möglich (Behrendt und Wulfmeyer, 2011).

Das Lidar WALES, das einen Prototyp für ein zukünftiges satellitengetragenes Wasserdampf DIAL darstellt, nutzt nicht nur eine sondern drei Online-Wellenlängen, sowie eine Offline-Wellenlänge in der 935 nm Wasserdampfabsorptionslinie. Die Nutzung von mehreren Online-Wellenlängen ermöglicht die Abdeckung der gesamten Troposphäre und unteren Stratosphäre, da jede der genutzten Wellenlängen in unterschiedlichen Höhenbereichen besonders stark absorbiert wird (Wirth et al., 2009).

2.4 Methoden der Datenauswertung

Für die Datenauswertung werden die Daten des Radars, des Lidars und zweier verschiedener Mikrowellenradiometerkanäle verwendet. Hierbei handelt es sich zum einen um den 31,4 GHz Kanal des Moduls HALO-KV und zum anderen um den 90,0 GHz Kanal des Moduls HALO-11990. Um quantifizieren zu können, wie gut die untersuchten Messgeräte in der Detektion von Wolken übereinstimmen, werden für die Auswertung nur Zeitschritte verwendet, in denen von allen Geräten eine Messung vorliegt. Für den Vergleich zwischen allen Geräten wird die Wolkenhäufigkeit, also das Verhältnis der Messungen, in denen eine Wolke registriert wurde, und der Gesamtanzahl der Messungen, untersucht.

Abhängig vom Kanal wird das von den Mikrowellenradiometern empfangene Signal

hauptsächlich von der Hydrometeoranzahl in der Gesamtsäule und von der Oberfläche, die je nach Material unterschiedliche Emissivitäten aufweist, beeinflusst. Im Gegensatz dazu werden die vom Radar und vom Lidar empfangenen Signale von der vertikalen Verteilung der Hydrometeore beeinflusst. Somit ist beim Vergleich von Radar und Lidar neben der Wolkenhäufigkeit auch die Wolkenoberkante ein geeignetes Vergleichskriterium. Da das Lidarsignal bei optisch dichten Wolken schnell gesättigt ist und den Erdboden nicht erreicht, wird nur die oberste Wolkenoberkante betrachtet. Zudem ist bei der Auswertung zu beachten, dass die Lidarmessungen erst in 600 m Entfernung zum Flugzeug beginnen. Die Radarmessungen, die oberhalb dieser Höhe aufgezeichnet wurden, werden für die Wolkenoberkante nicht berücksichtigt. Außerdem werden für die Berechnung der mittleren Wolkenoberkante nur Messungen verwendet, in denen von beiden Instrumenten eine Wolke registriert wurde. Neben der mittleren Wolkenoberkante wird auch die Anzahl der Messungen untersucht, in denen die von dem einen Gerät detektierten Wolken oberhalb der von dem anderen Gerät registrierten Wolken beginnen, respektive in denen beide Wolken in der gleichen Höhe beginnen. Das Radar und das Lidar messen in 30 m beziehungsweise 15 m umfassenden Höhenintervallen. Die Höhendifferenz, bei der die Wolken beider Geräte in der selben Höhe beginnen, wird auf 60 m, was zwei Radar- oder vier Lidarhöhenstufen entspricht, festgelegt, um die unterschiedlich stark ausgeprägte Empfindlichkeit der beiden Instrumente zu berücksichtigen. Nachfolgend werden Wolken, die vom Radar detektiert wurden als „Radarwolken“ und Wolken, die vom Lidar detektiert wurden als „Lidarwolken“ bezeichnet.

Ferner können die Profilmessungen vom Radar und vom Lidar in verschiedene Höhengschichten unterteilt werden, was eine Analyse der verschiedenen Wolkenstockwerke ermöglicht. Entsprechend der Klassifizierung der WMO (**World Meteorological Organization**) können Wolken in den mittleren Breiten in tiefe Wolken von 0 bis 2 km, in mittelhohe Wolken von 2 bis 7 km, in hohe Wolken von 5 bis 13 km und in Wolken, die sich über mehrere Stockwerke erstrecken, unterteilt werden (DWD, 1990). Da die meisten Flüge der NARVAL-Nord Kampagne in einer Flughöhe von etwa 8 km durchgeführt wurden, entfällt das Stockwerk der hohen Wolken bei der Auswertung. Zudem muss berücksichtigt werden, dass das DIAL auf einem optischen Verfahren beruht und unterhalb von optisch dichten Wolken keine Informationen liefert. Dadurch wird eine weitere Differenzierung der Wolkenschichten unterbunden und es ist keine Einteilung in tiefe und mittelhohe Wolken möglich. Aus diesem Grund werden die untersuchten Wolken in tiefe Wolken und in Wolken, die über mehrere Stockwerke reichen, unterteilt. Sobald das Signal des Lidars während eines Zeitschrittes gesättigt ist, wird davon ausgegangen, dass sich auch

in der tiefen Wolkenschicht eine Wolke befindet. Dies ist gerechtfertigt, da anhand der Radarmessungen belegt werden kann, dass die meisten untersuchten Wolken entweder über beide Wolkenschichten reichen oder erst in der unteren Wolkenschicht beginnen.

Anhand der Mikrowellenradiometermessungen soll die Wolkenhäufigkeit während der fünf Forschungsflüge untersucht werden. Während NARVAL-Nord wurden zahlreiche Eiswolken und Wolken, die unterkühlte Wassertropfen enthielten, überflogen. Da dies die Retrieval für den IWV und LWP erschwert, standen diese beiden Produkte zu dem Zeitpunkt, als diese Arbeit verfasst wurde, noch nicht zur Verfügung. Infolgedessen wird die Variabilität der gemessenen Helligkeitstemperaturen von zwei Kanälen untersucht. Bei den Kanälen handelt es sich zum einen um den 31,4 GHz Kanal im K-Band und zum anderen um den 90,0 GHz Fensterkanal im W-Band, die unter anderem zur Berechnung des LWP und IWV herangezogen werden können (Mech et al., 2014).

Um die Variabilität der gemessenen Helligkeitstemperatur quantifizieren zu können, wird die Standardabweichung σ berechnet.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.1)$$

Hierbei bezeichnet x_i den jeweils betrachteten Messwert und \bar{x} den Mittelwert über die betrachteten N Messungen. Für jeden Zeitschritt werden maximal zehn Sekunden vor und nach der Messung in die Berechnung einbezogen. Dies soll verhindern, dass das Signal zu stark geglättet wird, aber dennoch eine statistische Auswertung ermöglichen. Sobald die Standardabweichung über eine größere Anzahl an Messwerten berechnet wird, werden Sprünge in der gemessenen Helligkeitstemperatur heraus gemittelt. Dies verhindert die Detektion von Wolken, die nur wenige Sekunden lang überflogen wurden. Es ist zu beachten, dass die einzelnen Mikrowellenradiometermodule nicht jede Sekunde einen Messwert liefern, wodurch das betrachtete Zeitintervall meist weniger Messwerte als die maximal möglichen 21 Werte enthält.

Sobald sich das Mikrowellenradiometer über einem Gebiet mit einer erhöhten Wasserdampf- oder Flüssigwasserkonzentration befindet, steigt die Helligkeitstemperatur an respektive sinkt ab bei der Überquerung von Eiswolken. In beiden Fällen steigt die Standardabweichung der Helligkeitstemperatur (siehe Kapitel 3). Mithilfe der Videos der Kamera, die während der Flüge unter der linken Tragfläche von HALO angebracht war, sowie unter Zuhilfenahme der Radar- und Lidarmessungen werden wolkenfreie Flugintervalle herausgesucht, um das Rauschen der beiden gewählten Kanäle zu analysieren. Anschließend wird

ein Schwellwert für die Standardabweichung festgelegt, der über dem Rauschniveau liegt und ab dem davon auszugehen ist, dass sich eine Wolke unter dem Mikrowellenradiometer befindet. Dieser Schwellwert liegt bei HALO-11990 bei 0,4 K und bei HALO-KV bei 0,3 K.

Für die Auswertung der Radarmessungen werden sogenannte Level-2-Daten verwendet. Hierbei handelt es sich um eine Kombination der Radardaten und der Basisinstrumentierung des Flugzeuges. In diesem Produkt sind bei der Radarreflektivität keine artifiziellen Signale unterhalb der Erdoberfläche mehr enthalten, die durch Streuung an Niederschlag zustande kommen können. Des Weiteren entstehen diese Signale, wenn die Nebenkeulen des Radarsignals, bei denen es sich um die nicht direkt senkrecht nach unten ausgesendete elektromagnetische Strahlung handelt, die Oberfläche später erreichen als die Hauptkeule. Die Hauptkeule stellt den Bereich unterhalb des Flugzeugs dar, in dem der größte Beitrag der vom Radar ausgesendeten Energie auftritt.

Die Radardaten haben eine zeitliche Auflösung von einer Sekunde und unterteilen die Atmosphäre in maximal 487 Höhenstufen von jeweils 30 m Schichtdicke. Mit Ausnahme des Fluges vom 18.01.2014 betrug die Flughöhe während der fünf Forschungsflüge 8 km, was der Flugfläche 270 (FL270) entspricht. Am 18.01.2014 fand während des Fluges ein Flugflächenwechsel von FL270 auf FL430 statt, was einer Flughöhe von 13 km gleichkommt (Klepp und Bakan, 2014). Aus diesem Grund werden nicht alle 487 möglichen Höhenstufen, die eine Höhe von etwa 14 km abdecken, genutzt. Die Daten, die bei einem Rollwinkel von mehr als 3° beziehungsweise weniger als -3° aufgezeichnet wurden, werden für die Auswertung nicht verwendet. In diesen Fällen muss die feste Anzahl an Höhenstufen in dickere Schichten unterteilt werden, da sich in einer Kurve die gemessene Strecke zwischen Gerät und Erdboden vergrößert. Des Weiteren befinden sich die gemessenen Wolken in diesem Fall nicht mehr unter, sondern neben dem Flugzeug. Diese Anpassung wurde in den Level-2-Daten noch nicht vorgenommen. Zudem werden die unteren fünf Höhenstufen, was einer Höhe von etwa 287 m entspricht, bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da in ihnen der Bodenreflex enthalten ist (Abbildung 2.2). Dieser entsteht durch Streuung des Radarsignals am Erdboden. In den Rohdaten sind zusätzliche Signale im Boden zu erkennen, die durch Mehrfachstreuung am Boden entstehen und in den Level-2-Daten nicht mehr enthalten sind. Auffällig in Abbildung 2.2 ist ein verstärktes Bodensignal um 10:20 UT. Zu diesem Zeitpunkt wurde eine Kurve geflogen, sodass die Strecke, die das Radar misst, vergrößert wird und der Boden in einer größeren Entfernung zum Flugzeug erscheint.

Wie bei den Mikrowellenradiometern soll auch beim Radar die Wolkenhäufigkeit untersucht werden. Hierzu wird jede Sekunde, in der eine Reflektivität gemessen wurde als

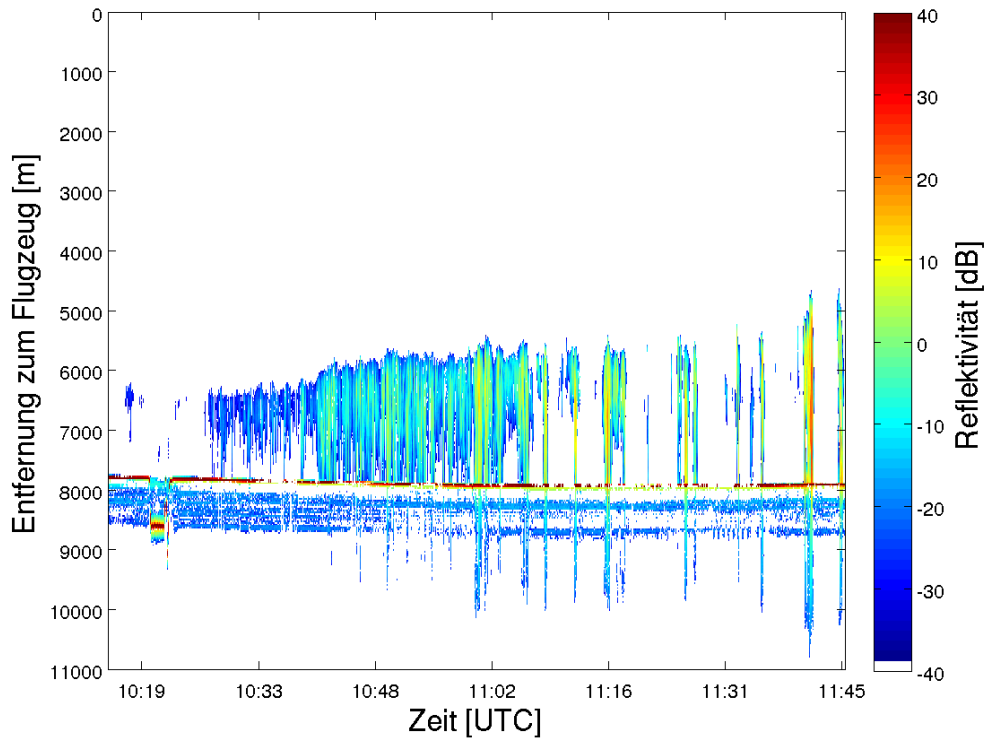


Abbildung 2.2: Zeitreihe der gemessenen Radarreflektivität für einen 90 minütigen Zeitraum während des dritten Forschungsfluges am 18.01.2014 (siehe Kapitel 3.2). In den Rohdaten sind sowohl Bodensignale, die in 7800 m Entfernung zum Flugzeug auftreten, als auch Signale, die durch Mehrfachstreuung am Boden entstehen, enthalten.

„bewölkt“ eingestuft. Entsprechend sind Sekunden, in denen keine Reflektivitäten im Datensatz vorhanden sind, als wolkenfreie Perioden festgelegt. Zeiten, in denen das Gerät ausgeschaltet war, werden nicht verwendet. Für die oberste Wolkenoberkante, die zum Vergleich mit den Lidarmessungen herangezogen wird, wird für jeden Messzeitpunkt, in dem eine Reflektivität gemessen wurde, die Höhe der obersten Messung ermittelt.

Wie beim Radar sollen auch für die Lidarmessungen die Wolkenhäufigkeit und die oberste Wolkenoberkante untersucht werden. Um die Wolkenhäufigkeit bestimmen zu können, muss zunächst das Rückstreuverhältnis R berechnet werden:

$$R = \frac{\beta_P + \beta_M}{\beta_M} = \frac{\beta_P}{\beta_M} + 1 \quad (2.2)$$

Es ergibt sich aus dem (Aerosol-)Partikel-Rückstreukoeffizienten β_P und dem molekularen Rückstreukoeffizienten β_M . Nach Wirth (2014) kann in der unteren und mittleren Tro-

osphäre bei einem Rückstreuverhältnis von mehr als sechs und im Bereich von Eiswolken ab einem Rückstreuverhältnis von zwei bis drei von einer Wolke ausgegangen werden.

In den zur Verfügung stehenden Daten ist lediglich der höhenabhängige (Aerosol-) Partikel-Rückstreukoeffizient enthalten, sodass der ebenfalls höhenabhängige molekulare Rückstreukoeffizient mithilfe des Rückstreuquerschnitts von Luft $\sigma_{bsc} = 6,24 \cdot 10^{-32} \text{ m}^2$ und der Teilchendichte der Luft ρ_L berechnet werden muss.

$$\beta_M = \rho_L \cdot \sigma_{bsc} \quad \text{mit} \quad \rho_L = \frac{p}{k_B \cdot T} \quad (2.3)$$

Hierbei bezeichnet p den Luftdruck, T die Temperatur und $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ die Boltzmann-Konstante.

Während der fünf Forschungsflüge wurden zusätzlich insgesamt 46 Dropsonden (Klepp und Bakan, 2014) aus dem Flugzeug abgeworfen, die ähnliche meteorologische Größen messen wie Radiosonden. Die für die Teilchendichte benötigten Temperatur- und Druckprofile können den Dropsondendaten entnommen werden.

Kapitel 3

Ergebnisse des Instrumentenvergleiches

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Instrumentenvergleiches dargestellt und erläutert. Zu Beginn wird auf alle fünf Forschungsflüge eingegangen (Kapitel 3.1), wobei die Flüge, die in den nachfolgenden Abbildungen als RF1 (Forschungsflug 1) bis RF5 (Forschungsflug 5) bezeichnet werden, an den in Tabelle 3.1 angegebenen Tagen und in den aufgeführten Flughöhen absolviert wurden. Anschließend werden der Forschungsflug vom 18.01.2014 untersucht (Kapitel 3.2) und eine Fallstudie an einem einzelnen Cumulonimbus während des zweiten Fluges durchgeführt (Kapitel 3.3).

Tabelle 3.1: Übersicht über die Termine der fünf Forschungsflüge mit ihrer jeweiligen Flugnummer und den geflogenen Flugflächen. FL270 entspricht einer Flughöhe von etwa 8 km und FL430 von etwa 13 km. Angegeben ist zudem die Dauer der einzelnen Forschungsflüge und deren Thematik.

Flugnummer	RF1	RF2	RF3	RF4	RF5
Datum	09.01.2014	12.01.2014	18.01.2014	20.01.2014	21.01.2014
Flugfläche	FL270	FL270	FL270, FL430	FL270	FL270
Flugdauer [Stunden]	9,10	6,63	5,90	8,50	6,20
Thematik	Kaltluftausbruch	hakenförmige Okklusion	Downstream Development	schwache Konvektion	sich verstärkendes Tief

3.1 Die fünf Forschungsflüge

Die fünf Forschungsflüge werden zunächst im Hinblick auf die Wolkenhäufigkeit analysiert, die vom Radar, vom Lidar und von den beiden untersuchten Mikrowellenradiometerkanälen des HALO-KV und des HALO-11990 Moduls gemessen wurde.

3.1. Die fünf Forschungsflüge

Die Wolkenhäufigkeit beträgt gemittelt über die Forschungsflüge und bei allen Instrumenten deutlich über 50 % (Abbildung 3.1). Im Mittel über die fünf Forschungsflüge hat das Lidar, das als einziges der verwendeten Instrumente ein optisches Messverfahren nutzt, mit fast 89 % der Zeit die meisten Wolken registriert, gefolgt vom Radar mit etwa 80 %, HALO-11990 mit etwa 77 % und HALO-KV mit etwa 64 % (Abbildung 3.1, linke Balkengruppe). Diese Reihenfolge findet sich in vier der fünf Forschungsflüge wieder. Wird die Wolkenhäufigkeit im Detail betrachtet, wird deutlich, dass das Radar lediglich während des dritten Forschungsfluges in etwa 2 % der Zeit keine Wolken erfasste, in denen HALO-11990 eine Wolke gemessen hat (Tabelle 3.2). Von den untersuchten Geräten stimmen diese beiden im Mittel über alle Flüge und während des zweiten bis fünften Forschungsfluges mit Abweichungen von 0,7 % während des zweiten und bis zu 4,6 % während des fünften Fluges am besten überein. Während des ersten Forschungsfluges sind sich hingegen die Radar- und die Lidarmessungen mit einer Abweichung von 0,3 % in der Wolkenhäufigkeit am ähnlichsten.

Im Gegensatz zu den anderen drei Geräten, die die niedrigste Wolkenhäufigkeit während des dritten Forschungsfluges zeigen, registrierte der genutzte Kanal des HALO-KV Moduls die wenigsten Wolken während des fünften Fluges. Da dieser Kanal vor allem sensitiv gegenüber des Flüssigwassergehaltes in der Atmosphäre ist, deutet dies darauf hin, dass

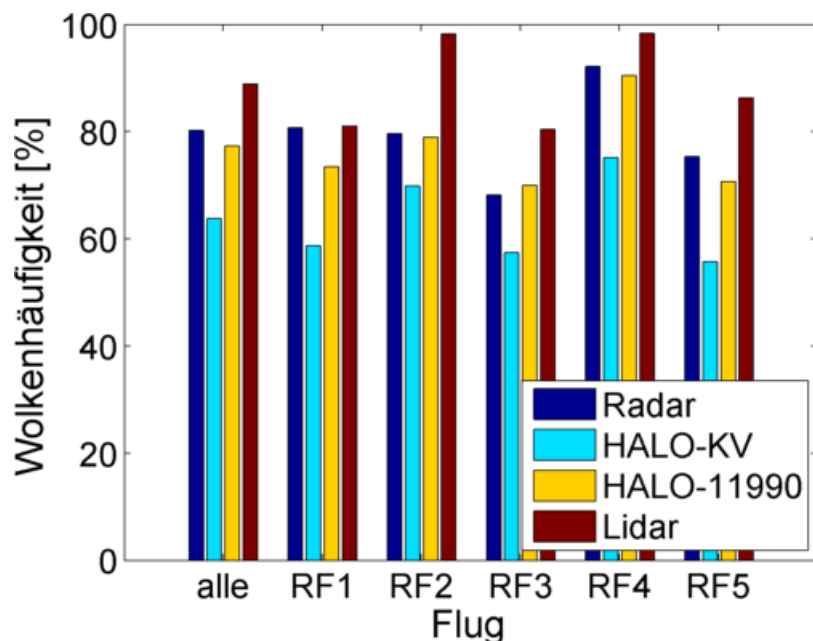


Abbildung 3.1: Prozentuale Wolkenhäufigkeit der vier untersuchten Messgeräte aufgetragen für die fünf Forschungsflüge und im Mittel über alle Flüge.

Tabelle 3.2: Kontingenztabelle für die fünf Forschungsflüge und alle möglichen Gerätekombinationen.

Pro Gerätekombination und Flug bezeichnen die Zahlen oben links den prozentualen Anteil der Messungen, in denen beide Geräte eine Wolke registriert haben und die Zahlen unten rechts den Anteil, in dem von beiden Geräten keine Wolke erkannt wurde. Die Zahl unten links gibt den prozentualen Anteil der Messungen wieder, in denen das zuerst genannte Gerät eine Wolke und das zuletzt genannte Gerät keine Wolke detektiert hat. Die Zahl oben rechts entspricht dem umgekehrten Fall.

	09.01.2014		12.01.2014		18.01.2014		20.01.2014		21.01.2014	
Lidar – HALO-11990	66,77	6,64	78,02	0,89	62,19	7,81	89,91	0,56	66,87	3,82
	14,25	12,34	20,20	0,89	18,17	11,84	8,36	1,17	19,42	9,88
Lidar – Radar	75,45	5,28	79,08	0,52	62,58	5,57	91,44	0,66	72,61	2,73
	5,57	13,70	19,13	1,27	17,77	14,08	6,83	1,07	13,69	10,97
Lidar – HALO-KV	55,11	3,62	69,16	0,66	52,40	5,00	74,83	0,31	54,24	1,51
	25,91	15,36	29,05	1,13	27,96	14,65	23,44	1,42	32,05	12,20
HALO-11990 – Radar	65,33	15,40	70,40	9,20	52,62	15,53	85,91	6,19	59,74	15,60
	8,08	11,12	8,51	11,89	17,37	14,48	4,56	3,34	10,95	13,70
HALO-11990 – HALO-KV	55,87	2,87	67,25	2,57	55,74	1,65	73,99	1,15	54,54	1,21
	17,54	23,72	11,66	18,52	14,25	28,35	16,48	8,38	16,16	28,09
Radar – HALO-KV	53,99	4,74	64,31	5,52	45,24	12,15	71,93	3,21	49,83	5,92
	26,74	14,52	15,29	14,89	22,91	19,70	20,17	4,69	25,51	18,74

am 21.01.2014 vermehrt Eiswolken überflogen wurden. Die größte Wolkenhäufigkeit wurde von allen vier Geräten während des vierten Forschungsfluges festgestellt. Während dieses Fluges müssen dementsprechend vermehrt flüssige Hydrometeore überflogen worden sein.

Die Unsicherheit zwischen den Geräten wird anhand der Differenz der maximalen und minimalen Wolkenhäufigkeiten pro Flug festgestellt. Diese wurden jeweils vom Lidar beziehungsweise von HALO-KV registriert. Die beste Übereinstimmung mit einer Differenz von etwa 22% ist während des ersten Forschungsfluges auszumachen, wohingegen die größte Diskrepanz zwischen den vier untersuchten Geräten während des fünften Forschungsfluges mit einer Unsicherheit von etwa 31% auftritt. Im Mittel über alle Flüge beträgt die Differenz etwa 25%. Diese recht großen Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass zahlreiche Eiswolken überflogen wurden, gegenüber denen HALO-KV nicht sensitiv ist. Wird dieses Gerät bei der Untersuchung der Unsicherheit in der Wolkendetektion nicht berücksichtigt, variiert die Differenz zwischen den maximalen und minimalen Wolkenhäufigkeiten zwischen etwa 8% während des ersten und vierten Forschungsfluges und etwa 19% während des zweiten Fluges. Im Mittel über alle Flüge liegt sie bei etwa 12% und somit deutlich unter der Unsicherheit bei der Berücksichtigung von HALO-KV.

Wie bereits beschrieben wurde, detektierte während der meisten Flüge das Lidar am häufigsten eine Wolke, gefolgt vom Radar, von HALO-11990 und von HALO-KV. Dies widerspricht den ursprünglichen Erwartungen, dass das Mikrowellenradiometer empfindlicher gegenüber Wolken ist als das Radar. Eine Erklärung für dieses Ergebnis ist, dass für die Analyse der vom Mikrowellenradiometer registrierten Wolken die Standardabweichung der gemessenen Helligkeitstemperatur genutzt wurde und nicht der üblicherweise verwendete LWP. Dadurch werden beispielsweise homogene Wolken mit einer relativ konstanten Helligkeitstemperatur und somit geringen Standardabweichung nicht erkannt. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, die Analyse der Mikrowellenradiometermessungen zu wiederholen, sobald die integrierten Produkte vorliegen. In diesem Fall erhält man nicht mehr zwei, sondern ein Ergebnis für die Mikrowellenradiometermessungen, das nicht von einzelnen Kanälen abhängig ist.

Bei der Verwendung der Standardabweichung sollte sich als Reihenfolge, mit der die Instrumente Wolken erkennen, ergeben, dass das Lidar am empfindlichsten ist, gefolgt von HALO-11990, vom Radar und von HALO-KV. Allerdings registrierten die drei zuletzt genannten Geräte nicht nur zu den Zeiten Wolken, in denen auch vom Lidar eine Wolke gesehen wurde. Idealerweise würde HALO-11990 nur eine Wolke anzeigen, wenn auch das Lidar eine Wolke misst. Das gleiche gilt für das Radar, das nur Wolken registrieren dürfte, wenn sowohl das Lidar als auch HALO-11990 eine Wolke detektieren, und HALO-KV, das nur Wolken erkennen sollte, wenn dies auch bei allen anderen Geräten der Fall ist. Je nachdem, welcher Flug betrachtet und welche beiden Geräte miteinander verglichen werden, schwankt die Zahl der „inkorrekt“ detektierten Wolken zwischen 0,3 % bei HALO-KV und WALES am 20.01.2014 und 15,6 % beim Radar und HALO-11990 während des fünften Forschungsfluges (Tabelle 3.2). Andererseits wurden zahlreiche Wolken „korrekt“ detektiert, das heißt, dass gleichzeitig von beiden Geräten eine Wolke oder keine Wolke registriert wurde. Diese Zahl schwankt je nach Flug und Gerätekombination zwischen 64,9 % zwischen dem Radar und HALO-KV am 18.01.2014 und 92,5 % zwischen dem Radar und dem Lidar während des vierten Forschungsfluges. Somit ist die Zahl der Übereinstimmungen deutlich größer als die Zahl der „inkorrekt“ detektierten Wolken.

Wie bei der Wolkenhäufigkeit hängen die Ergebnisse bei der mittleren Wolkenoberkante von den jeweiligen Forschungsflügen mit ihrer Vielfalt an überflogenen Wolkenarten ab. Vergleicht man die obersten Wolkenoberkanten, die vom Radar und vom Lidar detektiert wurden, ist ersichtlich, dass sich die Wolkenoberkante vom Radar im Mittel über alle Flüge und jeweils im Mittel über den ersten, zweiten und vierten Forschungsflug zwischen etwa 160 m und etwa 350 m über der Wolkenoberkante vom Lidar befindet (Ab-

bildung 3.2). Während des dritten Forschungsfluges ist die mittlere Wolkenoberkante bei beiden Instrumenten etwa gleich hoch und während des fünften Fluges liegt die mittlere Wolkenoberkante des Lidars 24 m über der des Radars. Diese Ergebnisse sind jedoch stark von den gewählten Schwellwerten abhängig, ab denen davon ausgegangen werden kann, dass das Radar und das Lidar eine Wolke detektiert haben und bedürfen weiteren Untersuchungen.

Obwohl sich die oberste Wolkenoberkante des Radars im Mittel über alle Flüge über der des Lidars befindet, beginnt in der Summe über alle Flüge die Lidarwolke häufiger über der Radarwolke als umgekehrt (Abbildung 3.3, linke Balkengruppe). Mit etwa 7100 von etwa 27700 Messungen befinden sich die beiden Wolkenoberkanten am seltensten in der gleichen Höhe. Die gleiche Verteilung findet sich während des ersten, dritten und fünften Forschungsfluges, wobei die Lidarwolke während RF1 und RF5 in fast doppelt so vielen Fällen oberhalb der Radarwolke beginnt wie umgekehrt. Dementsprechend muss die Radarwolke in einigen Sekunden deutlich oberhalb der Lidarwolke gelegen haben.

Während des vierten Forschungsfluges dominiert die Anzahl der Messungen, in denen beide Instrumente die Wolkenoberkante in der gleichen Höhe festgestellt haben. Während dieses Fluges wurden zahlreiche hohe Wolken überflogen, sodass beide Wolkenoberkanten in der Höhe lokalisiert werden, in der das Lidar die erste Messung liefert.

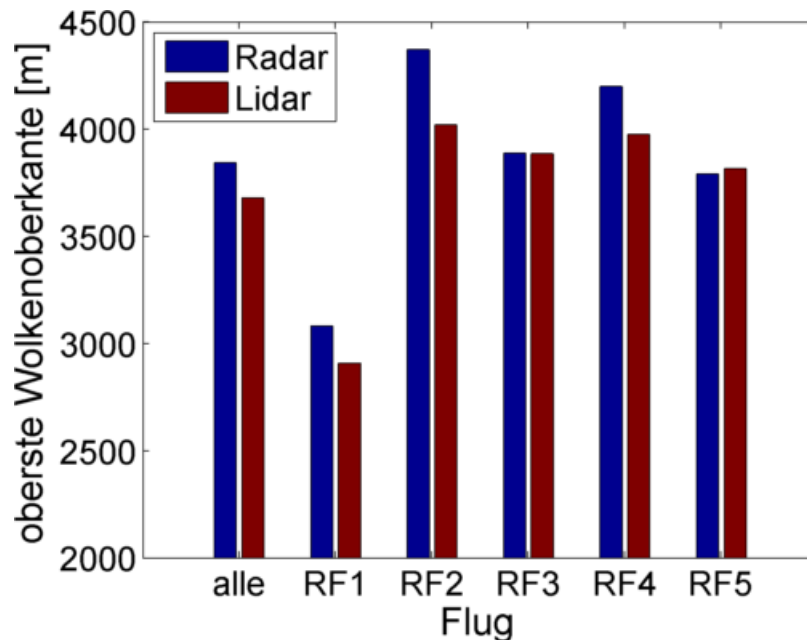


Abbildung 3.2: Mittel über die oberste Wolkenoberkante des Radars und des Lidars aufgetragen für die fünf Forschungsflüge und im Mittel über alle Flüge.

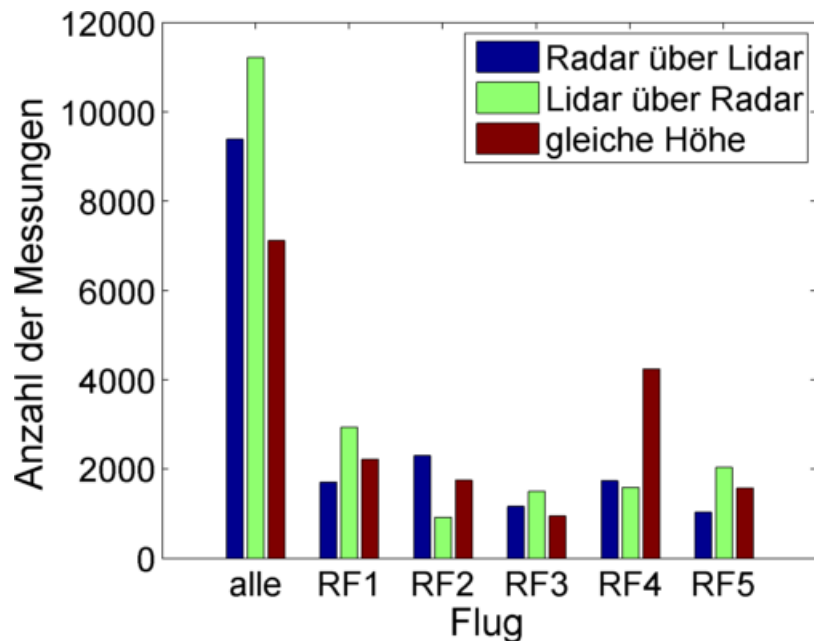


Abbildung 3.3: Anzahl der Messungen, in denen die Radarwolke über der Lidarwolke oder die Lidarwolke über der Radarwolke beginnt, sowie in denen sich die Wolkenoberkante in der gleichen Höhe befindet.

3.2 Der dritte Forschungsflug vom 18.01.2014

Während der fünf Forschungsflüge wurden verschiedene Wolkenregime überflogen, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen (Erdmann, 2014). Diese Wolkenregime lassen sich unter anderem mithilfe der Wolkenhäufigkeit und der Wolkenoberkante charakterisieren. Durch die in Kapitel 3.1 durchgeführten Mittelungen der Wolkenhäufigkeit und Wolkenoberkante über die fünf Forschungsflüge sind die Eigenschaften der einzelnen Wolkenregime nicht mehr zu erfassen. Aus diesem Grund werden nachfolgend fünf Flugabschnitte des dritten Forschungsfluges analysiert, die durch unterschiedliche Wolkenregime geprägt sind.

Während des ersten untersuchten Flugabschnittes wurde ein annähernd wolkenfreies Gebiet südöstlich von Grönland überflogen. In diesem Gebiet tritt häufig ein niedriger atmosphärischer Jet auf, der unter dem Namen „Tip Jet“ bekannt ist (Doyle und Shapiro, 1999). Der zweite Flugabschnitt ist durch flache Stratocumuli geprägt, wohingegen während des dritten Abschnittes vermehrt konvektive Cumuli überflogen wurden. Den Übergang zwischen den Cumuli des dritten und einer Front im fünften Abschnitt bildet eine Reihe von Cumulonimben im vierten untersuchten Flugabschnitt. In Abbildung 3.4 ist deutlich das zunächst annähernd wolkenfreie Gebiet des Tip Jets und die mit der Zeit durch zunehmende Konvektion ansteigende Wolkenoberkante zu erkennen. Die wichtigs-

ten Merkmale der einzelnen Flugabschnitte, sowie die in den nachfolgenden Abbildungen verwendeten Abkürzungen können Tabelle 3.3 entnommen werden.

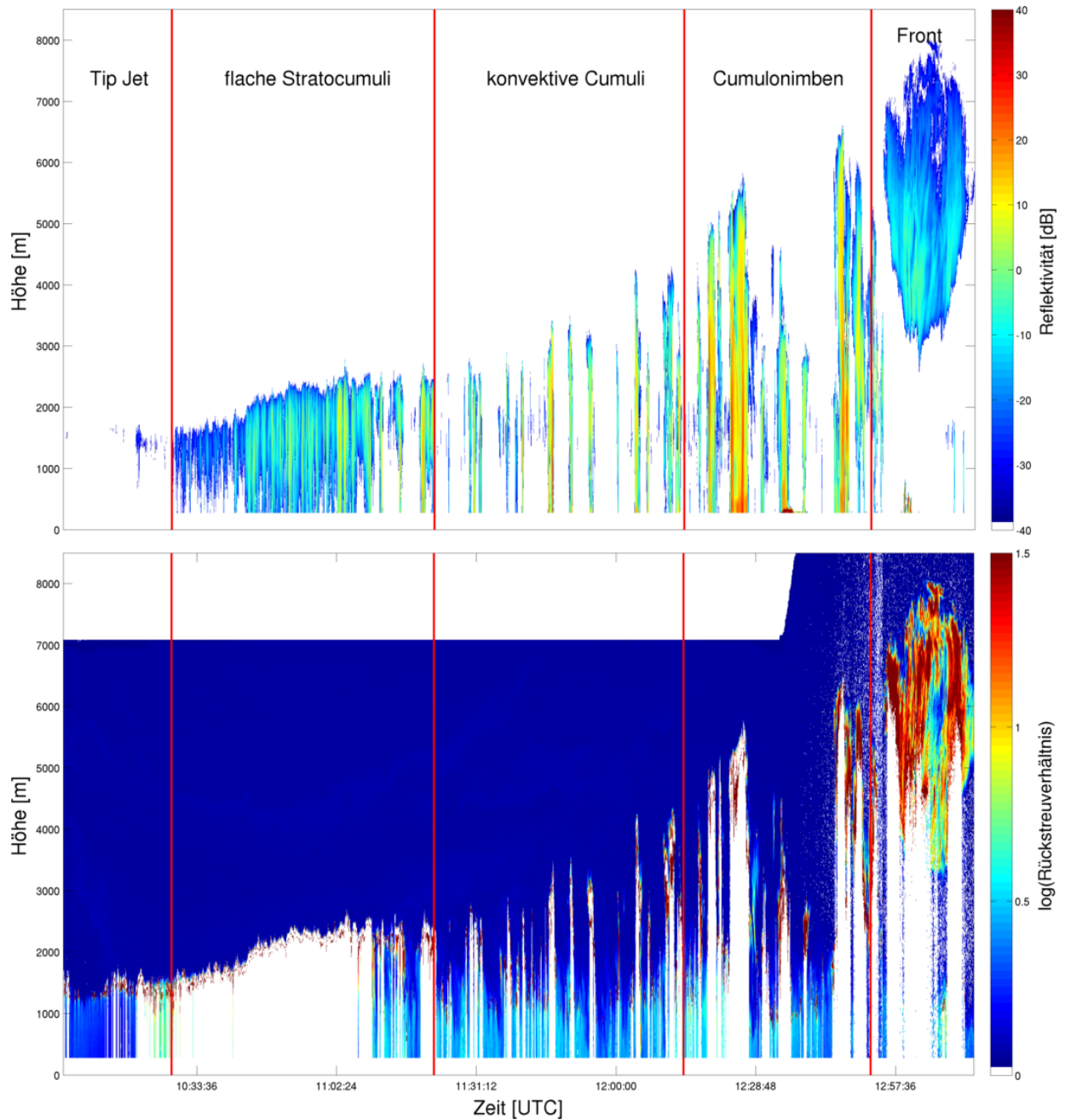


Abbildung 3.4: Profilmessung der Radarreflektivität (oben) und des logarithmisch aufgetragenen Rückstreuverhältnisses des Lidars (unten) unterteilt in die fünf untersuchten Flugabschnitte des dritten Forschungsfluges. Die Abschnitte sind durch rote Balken getrennt und entsprechend Tabelle 3.3 benannt.

Wie bereits in Kapitel 3.1 angedeutet wurde, stimmen die mittleren Wolkenoberkanten des Radars und des Lidars während des dritten Forschungsfluges in guter Näherung überein (Abbildung 3.2, RF3). Bei der Betrachtung der einzelnen Flugabschnitte ergibt sich, dass die Differenz der mittleren Wolkenoberkante zwischen den beiden Geräten zwischen etwa 8 m während des ersten und maximal 77,5 m während des letzten Flugabschnittes variiert, wobei während des dritten und vierten Flugabschnittes die mittlere Wolkenoberkante des Radars über der des Lidars und bei den übrigen Flugabschnitten die mittlere Wolkenoberkante des Lidars über der des Radars lokalisiert wurde (Abbildung 3.5). Da

Tabelle 3.3: Übersicht über die wichtigsten Merkmale der fünf untersuchten Flugabschnitte.

Flugabschnitt	Charakteristisches Merkmal	Abkürzung	Uhrzeit [UTC]	Flugfläche
1	Tip Jet	TJ	10:06-10:28	FL270
2	flache Stratocumuli	Sc	10:28-11:22	FL270
3	konvektive Cumuli	Cu	11:22-12:13	FL270
4	Cumulonimben	Cb	12:14-12:52	FL270, FL430
5	Front	Fr	12:53-13:13	FL270

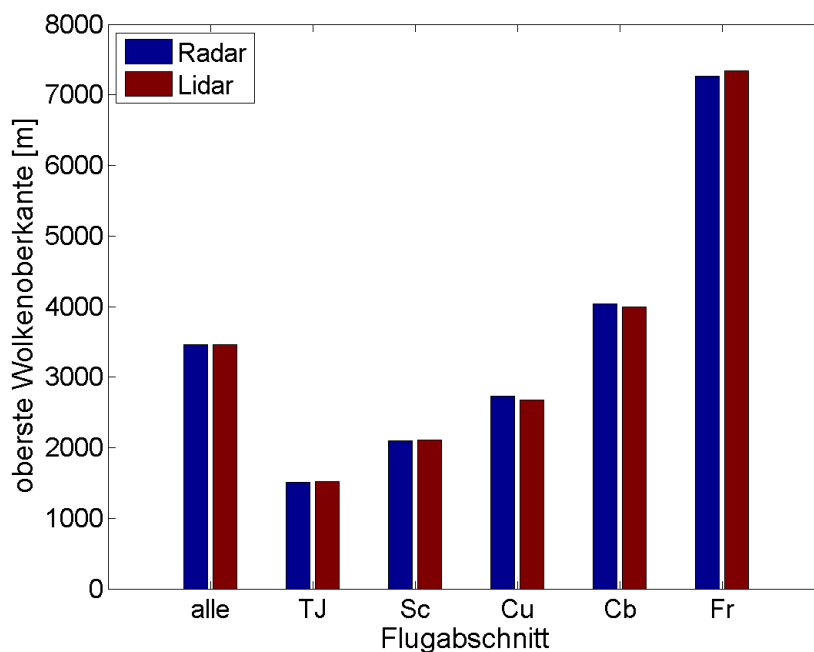


Abbildung 3.5: Höhe der mittleren Wolkenoberkante während der fünf Flugabschnitte und im Mittel über die fünf Abschnitte für die in Tabelle 3.3 genannten Regime.

das Radar und das Lidar mit einer vertikalen Auflösung von etwa 30 m beziehungsweise 15 m messen, liegen die Differenzen somit im Bereich von lediglich drei beziehungsweise sechs Höhenstufen. Demnach liefern die beiden Geräte bei den untersuchten Flugabschnitten mit ihren spezifischen Wolkenregimen sehr gut übereinstimmende Ergebnisse für die mittlere Wolkenoberkante.

Bei der Analyse der Anzahl der Messungen, während derer die Wolke des einen Gerätes oberhalb der Wolke des anderen beginnt, ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie im Mittel über die gesamten Flüge. Während des ersten, zweiten und fünften Flugabschnittes beginnt die Lidarwolke mit etwa 40 bis 61 % der Messungen jeweils am häufigsten oberhalb der Radarwolke (Abbildung 3.6). Im Gegensatz hierzu beginnt die Radarwolke während des dritten und vierten Abschnittes in etwa der Hälfte der Messungen über der Lidarwolke. Die Differenz zwischen der Anzahl der Messungen, in denen die Wolke des einen Gerätes über der des anderen beginnt, ist mit etwa 1,5 % während des vierten Flugabschnittes deutlich geringer als bei den anderen vier Flugabschnitten. Während aller fünf Abschnitte befinden sich die Wolkenoberkanten am seltensten in der gleichen Höhe. Mit fast 29 % der Messungen ist dies während des zweiten Flugabschnittes, in dem die flachen Cumuli überflogen wurden, am häufigsten der Fall.

Die Höhendifferenz, bei der die Wolken beider Geräte in der selben Höhe beginnen, wurde auf 60 m, was zwei Radar- oder vier Lidarhöhenstufen entspricht, festgelegt (Kapitel 2.4). Wird diese Differenz auf einen 120 m Intervall verdoppelt, reduziert sich die Anzahl der Messungen, in denen die Lidarwolke über der Radarwolke beginnt stärker als die Anzahl der Messungen, in denen die Radarwolke oberhalb der Lidarwolke registriert wurde. Dementsprechend wird bestätigt, dass die Radarwolke während der Messungen, in denen sie oberhalb der Lidarwolke registriert wurde, deutlich oberhalb der Lidarwolke beginnt und dass die Lidarwolke jeweils nur knapp oberhalb der Radarwolke lokalisiert wurde. Dadurch ergibt sich im Mittel über die einzelnen Flugabschnitte eine etwa in der gleichen Höhe befindliche mittlere Wolkenoberkante.

Neben der Tatsache, dass der dritte Forschungsflug in längere Flugabschnitte unterteilt werden kann, denen einzelne Wolkenregime zuzuordnen sind, wurde dieser Flug für den Instrumentenvergleich ausgewählt, da er der einzige der untersuchten Forschungsflüge ist, in dem in der Wolkenhäufigkeit die gemessene Instrumentenreihenfolge der erwarteten Reihenfolge entspricht. Betrachtet man jedoch die einzelnen Flugabschnitte, stimmt nicht nur die Instrumentenreihenfolge nicht mehr mit der mittleren Reihenfolge über die fünf Abschnitte überein, sondern sie weist während jedes der fünf Flugabschnitte eine andere Reihenfolge auf (Abbildung 3.7, oben).

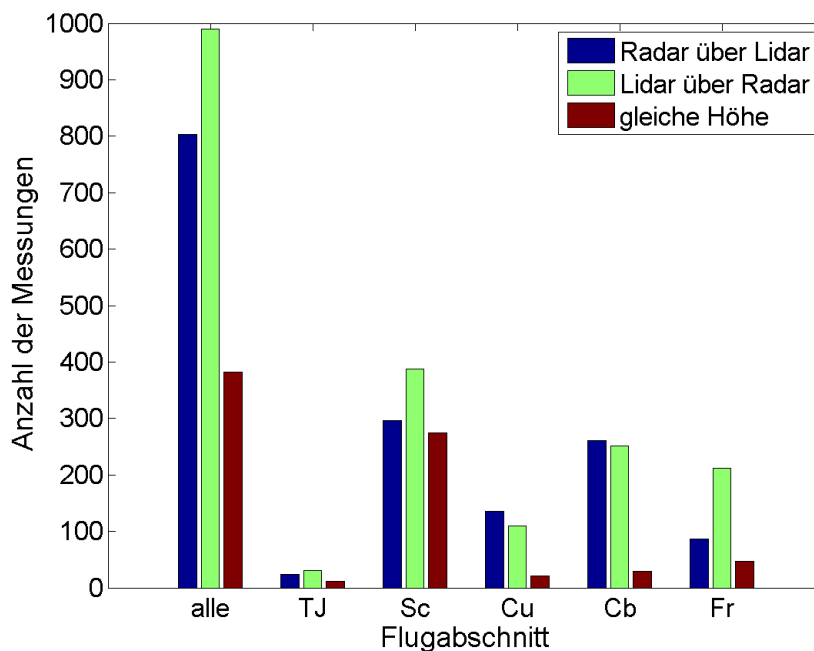


Abbildung 3.6: Anzahl der Messungen, in denen während der fünf untersuchten Flugabschnitte die Radarwolke über der Lidarwolke beziehungsweise die Lidarwolke über der Radarwolke beginnt, sowie in denen sich die Wolkenoberkante beider Geräte in der gleichen Höhe befindet.

Die detektierte Wolkenhäufigkeit während des ersten fast wolkenlosen Flugabschnittes des Tip Jet Gebietes ist sowohl beim Lidar als auch bei den beiden Mikrowellenradiometerkanälen mit etwa 40 bis 60 % deutlich zu hoch. Bei den beiden Mikrowellenradiometern lässt sich dies dadurch erklären, dass die überflogene Atmosphärenschicht eine inhomogene Wasserdampf- oder Flüssigwasserverteilung aufgewiesen haben muss. Dies gilt ebenfalls für das Lidar. Bei diesem Gerät kommt hinzu, dass es nicht nur empfindlich gegenüber Wasserpartikeln ist, sondern auch gegenüber Aerosolen, weshalb es in wolkenfreien Perioden zur Messung der atmosphärischen Grenzschicht eingesetzt werden kann. Unterteilt man die vermeintlichen Wolken, die vom Radar und vom Lidar registriert wurden, in tiefe Wolken, die bis in eine Höhe von 2 km reichen, und in Wolken, die mehrere Stockwerke einnehmen (Abbildung 3.7, unten), wird deutlich, dass sich alle vom Radar und vom Lidar während des ersten Flugabschnittes detektierten Wolken in der unteren Wolken-schicht befinden. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass es sich bei den vom Lidar registrierten „Wolken“ größtenteils um Rückstreuungssignale aus der Grenzschicht handelt. Dies wird durch das in Abbildung 3.4 dargestellte Lidarprofil bestätigt.

Die Unsicherheit zwischen den vier Geräten ist mit einer Differenz von etwa 7% zwischen HALO-11990 und HALO-KV während des zweiten Flugabschnittes am kleinsten, wohingegen sie während des Überfluges der Front mit einer Differenz von 48% zwischen dem Radar und HALO-KV ihr Maximum erreicht. Die gute Übereinstimmung während des zweiten Flugabschnittes wird dadurch erreicht, dass größtenteils ein Teppich flacher Stratocumuli überflogen wurde. Diese Wolken enthielten Schneekristalle, die von HALO-11990 und von den beiden aktiven Messgeräten registriert werden. Zudem weisen sie

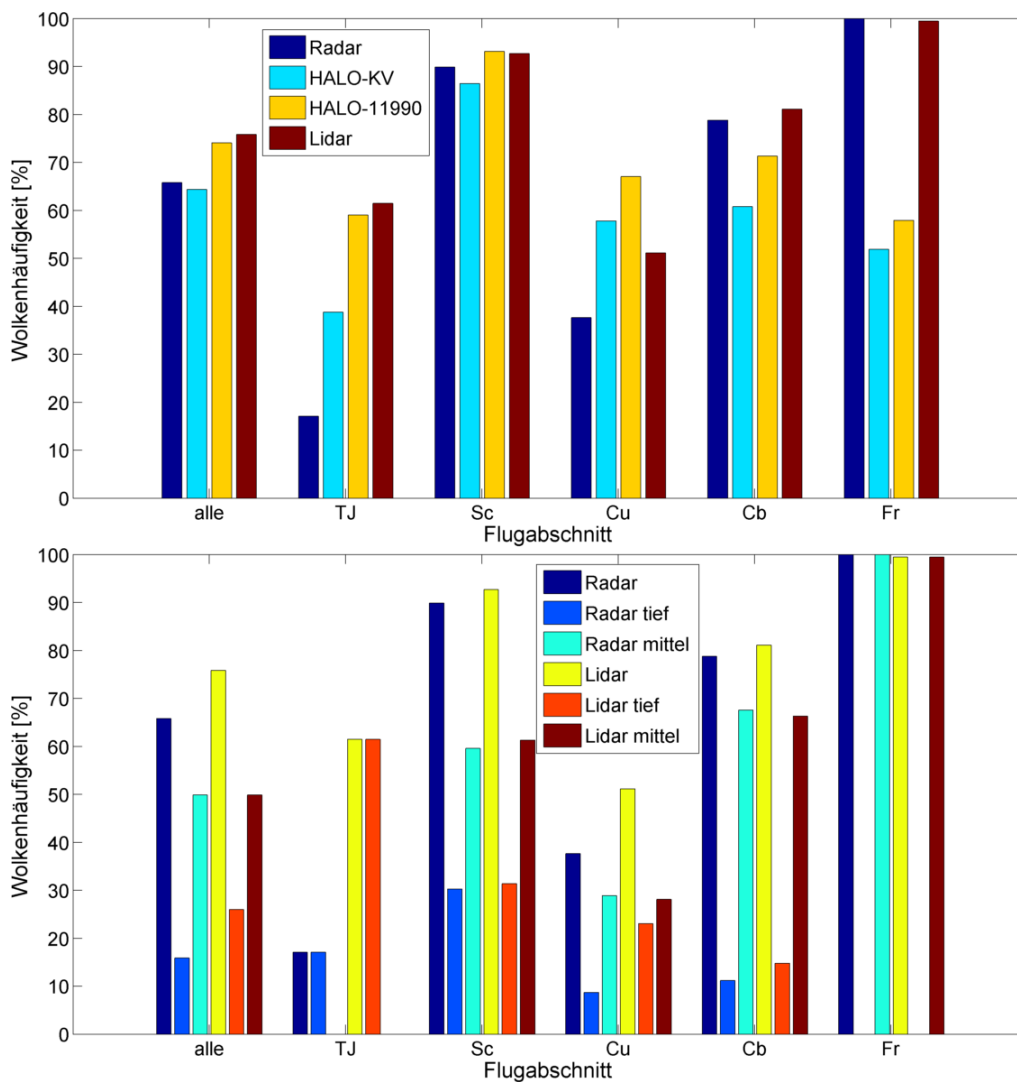


Abbildung 3.7: Wolkenhäufigkeiten der vier untersuchten Messgeräte aufgetragen für die fünf Flugabschnitte und im Mittel über alle Abschnitte (oben), sowie die Wolkenhäufigkeit des Radars und des Lidars aufgeteilt in tiefe Wolken und Wolken, die sich über mehrere Stockwerke erstrecken (unten).

eine inhomogene Struktur auf, sodass die Standardabweichung der gemessenen Helligkeitstemperaturen der beiden untersuchten Radiometerkanäle auf einem hohen Niveau bleibt. Beim Frontüberflug registrierten sowohl das Radar als auch das Lidar die gesamte Zeit eine Wolke, wohingegen die beiden Radiometerkanäle eine Wolkenhäufigkeit von 52 % beziehungsweise 58 % liefern. Da sich die Wolken der Front in einer Höhe von etwa drei bis acht Kilometern befinden (Abbildung 3.4), bestehen sie hauptsächlich aus Eispartikeln, die HALO-KV nicht registrieren kann. Zudem weist die Front relativ homogene Strukturen auf, sodass die Standardabweichung der Helligkeitstemperatur niedrige Werte annimmt und die Mikrowellenradiometer die Wolkenhäufigkeit unterschätzen.

Betrachtet man die Wolkenhäufigkeiten, die vom Radar und vom Lidar für die verschiedenen Wolkenschichten detektiert wurden, ist zu erkennen, dass während des ersten Flugabschnittes nur tiefe Wolken, während des letzten Abschnittes nur Wolken über mehrere Stockwerke und während der übrigen drei Flugabschnitte beide Typen vorkommen (Abbildung 3.7, unten). Zudem wird deutlich, dass abgesehen vom ersten Flugabschnitt die Anzahl der Wolken, die über mehrere Stockwerke hinausragen gegenüber der Anzahl der tiefen Wolken dominiert. Die Anzahl der über mehrere Stockwerke reichenden Wolken stimmt bei allen Flugabschnitten mit Abweichungen von bis zu zwei Prozent zwischen den beiden Instrumenten in guter Näherung überein. Im Gegensatz dazu schwanken die Differenzen der Häufigkeiten der tiefen Wolken zwischen Null Prozent während des fünften Abschnittes, in dem keine tiefen Wolken registriert wurden, und bis zu 44 % während des ersten Flugabschnittes. Diese Differenzen sind vermutlich ebenfalls auf Aerosole in den unteren zwei Kilometern der Atmosphäre zurückzuführen. Es ist zu beachten, dass während des letzten Flugabschnittes die Front überflogen wurde, die erst in einer Höhe von etwa 3 km beginnt und somit nicht in die Klasse der über mehrere Stockwerke reichenden Wolken eingeteilt werden dürfte. Da das Lidarsignal unterhalb der Front gesättigt ist, steht jedoch keine andere Möglichkeit für die Auswertung der Lidarmessungen zur Verfügung, solange die Auswertung nicht von anderen Geräten abhängig gemacht werden soll.

3.3 Fallstudie an einem Cumulonimbus vom 12.01.2014

Nicht nur während des dritten, sondern auch im Laufe des zweiten Forschungsfluges wurde eine Reihe von Cumulonimben überflogen, von denen HALO eine mittig überquerte. Im Folgenden werden die bereits in den beiden vorangehenden Unterkapiteln untersuchten Wolkeneigenschaften im Detail an dieser alleinstehenden konvektiven Gewitterwolke des zweiten Forschungsfluges analysiert. Um einen Eindruck von der Wolkensituation, wie sie

aus dem Flugzeug wahrgenommen wurde, zu erhalten, zeigt Abbildung 3.8 ein während des dritten Fluges aufgenommenes Foto, auf dem die Cumulonimben des vierten Flugabschnittes zu sehen sind. Aufgrund der schlechten Sichtverhältnisse in der morgendlichen Dämmerung des zweiten Fluges wird kein Foto der tatsächlich untersuchten Wolke gezeigt.

Der untersuchte Cumulonimbus wurde am 12.01.2014 im Zeitraum von 09:44:40 UT bis 09:47:54 UT überflogen. Dies deckt einen Periode von 195 Sekunden ab, in der in 71 Sekunden von allen vier Geräten eine Messung vorliegt. Betrachtet man die Profilmessungen des Radars und des Lidars, sowie die Zeitreihen der gemessenen Helligkeitstemperaturen der beiden Mikrowellenradiometermodule, erkennt man die unterschiedliche Empfindlichkeit der verwendeten Geräte (Abbildung 3.9).

In der Radarmessung sind deutlich die Kontur und die innere Struktur des Cumulonimbus zu erkennen. Besonders auffallend ist das von etwa 09:45:38 UT bis 09:46:58 UT andauernde und bis in eine Höhe von etwa 800 m reichende Brightband, das im Radarprofil in Abbildung 3.9 rot dargestellt ist. Dieses Brightband spiegelt sich auch in den Mikrowellenradiometermessungen wider, indem bei beiden Kanälen die gemessenen Helligkeitstemperaturen um jeweils bis zu 28 K ansteigen. Im Lidarprofil ist das Brightband nicht zu erkennen, da der Cumulonimbus eine optisch dichte Wolke ist und das Lidar-



Abbildung 3.8: Während des dritten Forschungsfluges aufgenommenes Foto, das 4 km hohe Cumulonimben zeigt, die während des vierten Flugabschnittes überflogen wurden. Dieses Foto wird exemplarisch für den Fall des 12.01.2014 gezeigt (Quelle: Dr. Christian Klepp, Universität Hamburg).

3.3. Fallstudie an einem Cumulonimbus vom 12.01.2014

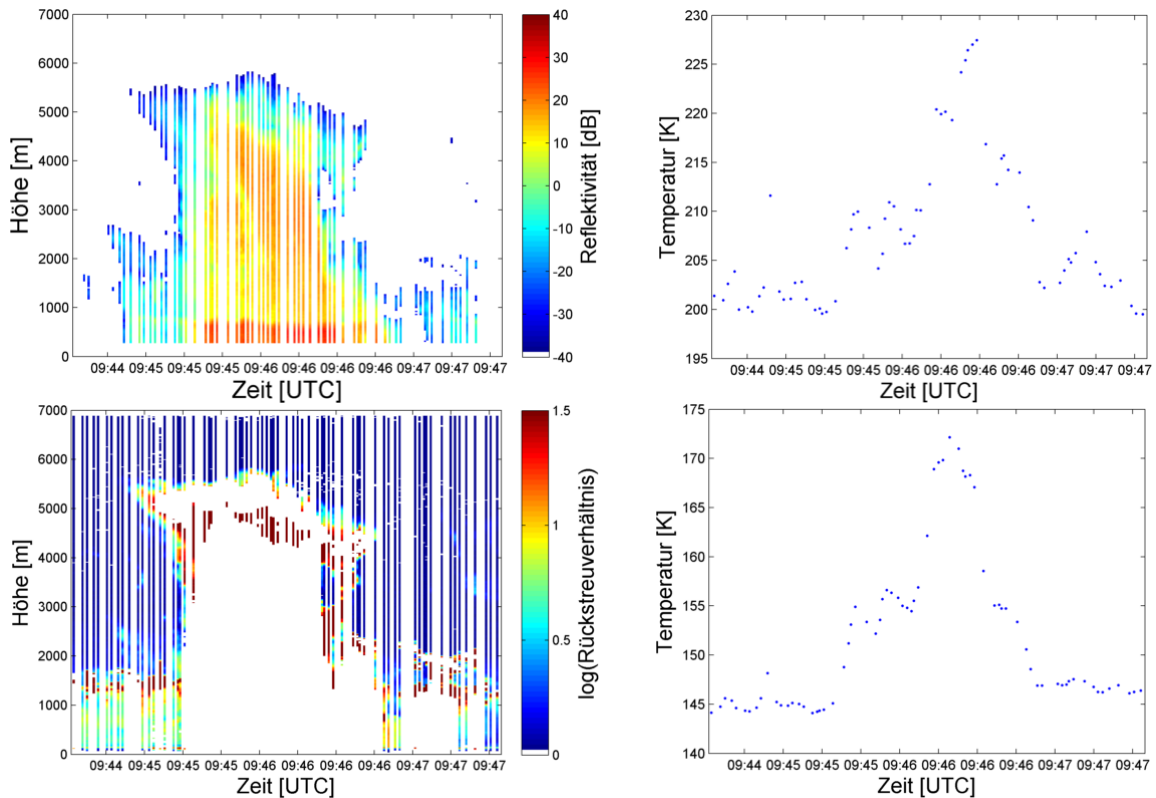


Abbildung 3.9: Profil der Radarreflektivität (oben links) und des logarithmisch aufgetragenen Rückstreuverhältnisses des Lidars (unten links), sowie die Zeitreihen der gemessenen Helligkeitstemperaturen der untersuchten Mikrowellenradiometerkanäle (HALO-11990, oben rechts; HALO-KV, unten rechts) für den untersuchten Cumulonimbus. Die weißen Balken in den Profilen stellen die Sekunden dar, in denen keine zeitgleichen Messungen von allen vier untersuchten Geräten vorliegen.

signal einige Meter unter der Wolkenoberkante gesättigt ist. Demnach kann mithilfe der Lidarmessungen kaum bis gar nicht auf die innere Struktur der Wolke geschlossen werden. Zudem ist das Signal in den Randbereichen der Wolke unterhalb des ausgeprägten Ambosses geschwächt. Dadurch ist beispielsweise die Wolkenausbuchtung, die um etwa 09:45 UT im Radarprofil zu erkennen ist, im Lidarprofil kaum auszumachen. Wird der Schwellwert, ab dem beim Lidar von einer Wolke ausgegangen werden kann, herabgesetzt, kann diese Ausbuchtung detektiert werden. Hingegen ist die oberste Wolkenoberkante im Lidarprofil deutlich zu erfassen und in den Randbereichen des Ambosses sind genauere Strukturen auszumachen als im Radarprofil. Kombiniert man diese beiden Profile, erhält man einen exakteren Eindruck davon, wie die Wolke ausgesehen hat, als wenn man die Profile unabhängig voneinander betrachtet.

Von den 71 vorliegenden Messungen wurde während 65 Sekunden sowohl vom Radar als auch vom Lidar eine Wolke registriert. Mit einer mittleren Wolkenoberkante von etwa 4290 m beim Radar und 4120 m beim Lidar befinden sich die beiden Wolkenoberkanten in der gleichen Reihenfolge in einem ähnlichen Niveau, wie es bereits während des vierten Flugabschnittes des dritten Forschungsfluges (Kapitel 3.2) festgestellt wurde. Mit 36 Messungen beginnt die Radarwolke exakt doppelt so oft über der Lidarwolke wie umgekehrt und in 17 % der Messungen beginnen die Wolken beider Instrumente in der gleichen Höhe. Wie mithilfe von Abbildung 3.10 nachvollzogen werden kann, stimmen die Wolkenoberkanten beider Geräte im Bereich des Ambosses mit Abweichungen von etwa zwei bis 400 m gut überein, wohingegen sie in den Randbereichen der Wolke bis zu 3700 m voneinander abweichen. Dies liegt unter anderem daran, dass das Lidar den Amboss länger registriert als das Radar, da das Radar dafür nicht empfindlich genug ist.

Beim Vergleich der Wolkenhäufigkeit, die von den vier Geräten registriert wurde, ergibt sich die ursprünglich erwartete Reihenfolge, dass das Lidar die meisten Wolken sieht, gefolgt von HALO-11990, vom Radar und von HALO-KV (Abbildung 3.11). Im Gegensatz zu dem in Kapitel 3.1 gefundenen Ergebnis erkannten die vier Geräte nur Wolken, wenn dies auch bei dem jeweils als empfindlicher eingestuften Instrument der Fall war. Sowohl das Lidar als auch HALO-11990 detektierten mit 100 % und 98,6 % fast die gesamte Zeit über eine Wolke. Die Radarwolke beginnt später als bei den anderen beiden Instrumenten und endet früher, womit sich eine etwa 7 % geringere Wolkenhäufigkeit als bei HALO-11990 ergibt. Mit lediglich etwa 70,4 % registrierte HALO-KV die wenigsten Wolken.

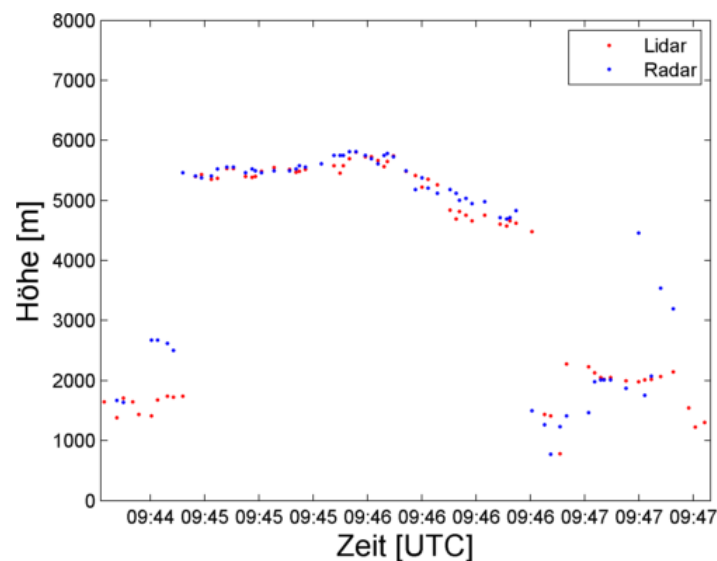


Abbildung 3.10: Vergleich der gemessenen Wolkenoberkante des Radars und des Lidars.

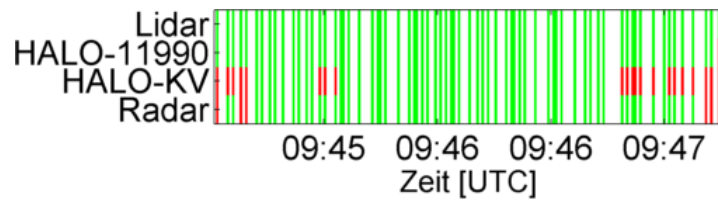


Abbildung 3.11: Wolkenhäufigkeit für die vier untersuchten Messgeräte. Grün dargestellt sind die Messungen, während derer die einzelnen Geräte eine Wolke detektiert haben. Rot eingefärbt sind die Sekunden, in denen die Geräte keine Wolke registriert haben und die weißen Balken stellen die Sekunden dar, in denen keine zeitgleichen Messungen von allen vier untersuchten Geräten vorliegen.

Auffällig ist, dass dieses Gerät im Bereich des Ambosses um etwa 09:45:21 UT kurzzeitig keine Wolke registrierte, wo von allen übrigen Geräten eine Wolke detektiert wurde. Zudem erkannte HALO-KV kurz nach der Überquerung des Ambosses kaum noch Wolken. Dies liegt daran, dass zu diesen Zeitpunkten vereiste Wolken überflogen wurden, die der Kanal nicht erkennt.

Kapitel 4

Zusammenfassung und Ausblick

Wolken sind wichtige Faktoren des Klimasystems, die jedoch noch nicht ausreichend genug verstanden sind und weiterer Untersuchungen bedürfen. Satelliten sind geeignet, Wolken auf globaler Skala zu erforschen. Vor allem über den Ozeanen sind jedoch kaum in-situ und Fernerkundungsmessungen zur Evaluierung und Validierung der Satellitendaten vorhanden. Die NARVAL-Nord Kampagne wurde südlich von Island über dem Nordatlantik initiiert, um die Fernerkundungsmessungen der Satelliten mit den Fernerkundungsmessungen der an Bord von HALO installierten Geräte zu vergleichen. Bei diesen Geräten handelt es sich unter anderem um das HALO Microwave Package, bestehend aus einem Radar und drei Mikrowellenradiometermodulen, und um ein Wasserdampf DIAL.

Vergleiche der Wolkenhäufigkeit und der Wolkenoberkante zwischen den verwendeten Instrumenten haben bestätigt, dass Wolken zu variabel in Ort und Zeit sind, um allgemeine Aussagen über die untersuchten Eigenschaften treffen zu können.

Für die Wolkenhäufigkeiten ergeben sich im Mittel über die fünf einzelnen Forschungsflüge jeweils ähnliche Reihenfolgen, in denen die Instrumente die Wolken detektieren. Es hat sich ergeben, dass nach den verwendeten Kriterien das Lidar im Mittel das empfindlichste Gerät ist, gefolgt vom Radar, von HALO-11990 und von HALO-KV. Mit einer Geräteunsicherheit von bis zu 19 % unter Vernachlässigung des HALO-KV Moduls und bis zu 31 % bei Berücksichtigung des Moduls variieren die einzelnen Ergebnisse allerdings recht stark, da die Geräte unterschiedlich empfindlich auf die verschiedenen überflogenen Wolken reagieren. Im Gegensatz hierzu hat sich bei der Analyse von fünf Flugabschnitten während des dritten Forschungsfluges ergeben, dass sich je nach überflogenem Wolkenregime eine andere Instrumentenreihenfolge ergibt und die Diskrepanz zwischen den einzelnen Geräten bis zu 40 % beträgt. Untersucht man eine einzelne Wolke und vernachlässigt erneut das HALO-KV Modul variieren die Wolkenhäufigkeiten zwischen den einzelnen Geräten zwischen 91,6 und 100 % und stimmen demnach in guter Näherung überein.

Für die oberste Wolkenoberkante ergibt sich für einen Großteil der untersuchten Fälle, dass die Radarwolke im Mittel bis zu 350 m oberhalb der Lidarwolke registriert wird. Betrachtet man jedoch die Anzahl der Messungen, in denen die Radarwolke oberhalb der Lidarwolke, die Lidarwolke oberhalb der Radarwolke oder beide Wolken in der gleichen Höhe beginnen, kann keine allgemeine Aussage darüber getroffen werden, welches Gerät die Wolke häufiger in einer größeren Höhe detektiert. Dies ist beispielsweise von den überflogenen Wolkenarten und den Umgebungsbedingungen abhängig. Dennoch wurde festgestellt, dass die Lidarwolke in vielen Fällen oberhalb der Radarwolke beginnt. Da die Radarwolke im Mittel oberhalb der Lidarwolke detektiert wurde, muss die Radarwolke in den Fällen, in denen sie oberhalb der Lidarwolke registriert wurde, demnach deutlich oberhalb der Lidarwolke beginnen.

Um eine bessere Übereinstimmung in der Detektion der Wolkenoberkante zu erhalten, ist es möglich, den Schwellwert beim Lidar anzupassen, ab dem davon auszugehen ist, dass das Gerät eine Wolke detektiert hat. Damit auch optisch dünnere Wolken erfasst werden, müsste der Schwellwert herabgesetzt werden. Dies ist sinnvoll, solange sich unter dem Gerät eine Wolke befunden hat. In wolkenfreien Perioden, wie sie beispielsweise während des dritten Forschungsfluges untersucht wurden, müsste der Schwellwert jedoch angehoben werden, damit keine Rückstreusignale aus der Grenzschicht als Wolken eingestuft werden. Die Wahl des Schwellwertes kann im Zuge weiterer Analysen der Daten weiter differenziert werden.

In einem möglichen nächsten Auswertungsschritt sollten die Analysen für die Mikrowellenradiometer mithilfe des vertikal integrierten Wasserdampfgehaltes und des Flüssigwassergehaltes der Atmosphäre wiederholt werden. Dies ist empfehlenswert, da bei der in dieser Arbeit verwendeten Methode homogene Wolken nicht erfasst werden und das HALO-KV Modul gleichzeitig nicht sensitiv gegenüber Eispartikeln in der Atmosphäre ist.

Des Weiteren wurden bei der vorliegenden Analyse keine Flugkurven untersucht und es wurde vernachlässigt, dass die Geräte an unterschiedlichen Positionen des sieben Meter langen Bellypods montiert sind und dementsprechend nicht exakt die gleichen Wolken vermessen können. Dies kann ebenfalls in weiteren Auswertungen berücksichtigt werden.

Sobald die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der während der NARVAL Kampagne an Bord von HALO installierten Fernerkundungsgeräte ausreichend genau erfasst wurden, können die bei der Kampagne aufgezeichneten Daten zur Evaluierung und Validierung von Satellitendaten eingesetzt werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen beiden Betreuern Prof. Dr. Felix Ament und Dr. Christian Klepp, die sich stets Zeit für mich genommen haben, wenn ich mit Problemen zu ihnen gekommen bin. Auch die übrigen Mitglieder des Hamburger NARVAL-Nord Teams sollen an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben. Dr. Stephan Bakan, Dr. Lutz Hirsch, Friedhelm Jansen, Heike Konow und Akio Hansen, vielen Dank für die wöchentlichen Treffen, während denen anregende Gespräche geführt und zahlreiche Fragen beantwortet wurden.

Ein Höhepunkt während der Arbeit mit den NARVAL-Daten war der NARVAL Workshop im Juni 2014, auf dem die beteiligten Institutionen erste Ergebnisse ausgetauscht und weitere Auswertungsschritte besprochen haben.

Namentlich erwähnen möchte ich hier zudem Heike Konow für die Unterstützung im Umgang mit Matlab und LaTeX. Außerdem danke ich Dr. Martin Wirth vom DLR für die Beantwortung meiner Fragen bezüglich der Lidardaten, sowie Dr. Emiliano Orlandi von der Universität zu Köln für die Hilfe im Umgang mit den Mikrowellenradiometerdaten. Bei meinem Kommilitonen Felix Erdmann möchte ich mich für die Gespräche bedanken, in denen Ergebnisse ausgetauscht und neue Ideen entwickelt wurden.

Außerdem danke ich allen an NARVAL Beteiligten für die Bereitstellung der Daten, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre, sowie Dr. Christian Klepp und Friedhelm Jansen für die Genehmigung, ihre Fotos in meiner Arbeit zu verwenden.

Nicht zuletzt gebührt meinen Eltern und meinem Bruder großer Dank, da sie während der letzten drei Jahre stets für mich da waren, mich angespornt und mir den Rücken freigehalten haben.

Literaturverzeichnis

- Andersson, A., K. Fenning, C. Klepp, S. Bakan, H. Grassl und J. Schulz, 2010. The Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data - HOAPS-3. *Earth System Science Data* 2, 215–234.
- Behrendt, A. und V. Wulfmeyer, 2011. Messungen der räumlichen und zeitlichen Struktur der Wasserdampfverteilung mit DIAL. *promet* 36(3/4), 154–160.
- Crewell, S. und Löhnert, U., M. Mech und C. Simmer, 2011. Mikrowellenradiometrie für Wasserdampf- und Wolkenbeobachtung. *promet* 36(3/4), 109–118.
- Doyle, J. D. und M. A. Shapiro, 1999. Flow response to large-scale topography: the Greenland tip jet. *Tellus* 51 A, 728–748.
- DWD (Hrsg.), 1990. *Internationaler Wolkenatlas* (2 Aufl.). Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.
- Erdmann, F., 2014. Thema der Arbeit: Properties of satellite observed North Atlantic cloud regimes evaluated by measurements of the HALO research flights during the NARVAL North campaign. *Bachelorarbeit, Universität Hamburg*.
- Klepp, C. und S. Bakan, 2014. NARVAL-North - Research Flight Reports. *Pers.com..*
- Klepp, C.-P., S. Bakan und H. Graßl, 2003. Improvements of Satellite-Derived Cyclonic Rainfall over the North Atlantic. *Journal of Climate* 16, 657–669.
- Klepp, C.-P., S. Bakan und H. Grassl, 2005. Missing North Atlantic cyclonic precipitation in ECMWF numerical weather prediction and ERA-40 data detected through the satellite climatology HOAPS II. *Meteorologische Zeitschrift* 14(6), 809–821.
- Mech, M., E. Orlandi, S. Crewell, F. Ament, L. Hirsch, M. Hagen, G. Peters und B. Stevens, 2014. HAMP - the new microwave package on the High Altitude and Long range research aircraft HALO. *Manuscript prepared for Atmos. Meas. Tech..*

- Müsse, J., 2012. Approaches to forecast postfrontal precipitation events over the North Atlantic. *Bachelorarbeit, Universität Hamburg*.
- Rose, T., 2009. *HAMP (HALO Microwave Package) Radiometer Systems (HALO-KV, HALO-119-90, HALO-183) - System Specific Information* (1.00 Aufl.). 53340 Meckenheim, Germany. Radiometer Physics GmbH.
- Rosen, R. D., T. Oki, E. Kalnay, M. Ji und A. Kumar, 2007. Global Energy and Water Cycles. *Cambridge University Press*.
- Stevens, B. und S. Bony, 2013. What are climate models missing. *Science* *340*, 1053–1054.
- Stevens, B., C. Klepp, L. Hirsch, G. Peters, S. Bakan, F. Ament und J. Quaas, 2010. NARVAL - Next-generation Aircraft Remote-Sensing for Validation Studies. *Whitebook*.
- Wirth, M., 2014. Persönlicher Email-Verkehr. *Pers.com.*
- Wirth, M., A. Fix, P. Mahnke, H. Schwarzer, F. Schrandt und G. Ehret, 2009. The airborne multi-wavelength water vapor differential absorption lidar WALES: system design and performance. *Applied Physics B: Lasers and Optics* *96*, 201–213.
- Ziereis, H. und M. Gläßler, 2006. Global Player für die Atmosphärenforschung - HALO wird das neue Flaggschiff der Forschungsflotte. *DLR-Magazin* *115*, 32–36.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel – insbesondere keine im Literaturverzeichnis nicht benannten Internet-Quellen – verwendet habe. Die Arbeit habe ich vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht. Die eingereichte schriftliche Fassung entspricht der auf dem elektronischen Speichermedium.

Ich bin damit einverstanden, dass ein Exemplar der Abschlussarbeit der Institutsbibliothek zur Verfügung gestellt wird.

Datum:

.....

Nicole Albern