

Der Wolkenbedeckungsgrad während der Messkampagne NARVAL-2



BACHELORARBEIT
AN DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK DER
LUDWIG-MAXIMILIANS UNIVERSITÄT MÜNCHEN

VORGELEGT VON
Sabrina Jessica Pavicic

MÜNCHEN, DEN 13.03.2018

Prüfer:
Prof. Dr. Bernhard Mayer

Betreuer:
Dr. Tobias Zinner

Cloudfraction during the NARVAL-2 campaign



BACHELOR THESIS AT THE FACULTY OF PHYSICS,
LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITY MUNICH

SUBMITTED BY
Sabrina Jessica Pavicic

MUNICH, GERMANY, MARCH 13TH 2018

Examiner:
Prof. Dr. Bernhard Mayer

Supervisor:
Dr. Tobias Zinner

Zusammenfassung

Wolken und Niederschlag spielen eine wichtige Rolle im Wasser- und Energiekreislauf des Klimasystems und beeinflussen maßgeblich die Strahlungsbilanz der Erde. Aus diesem Grund ist das Verständnis der Prozesse, die zur Wolkenbildung und -entwicklung führen von großem Interesse. Insbesondere der Bedeckungsgrad spielt hier eine wichtige Rolle. Um die Kopplung von Wolken und Klima über dem tropischen und subtropischen Ozean besser verstehen zu können, startete am 8. August 2016 die NARVAL-II Kampagne. Während der Kampagne waren unter anderem zwei Wolkenspektrometer specMACS und SMART, das Lidar WALES und das HALO Microwave Package HAMP Radar an Bord des Forschungsflugzeuges HALO montiert. In dieser Arbeit soll untersucht werden, wie gut die verwendeten Messgeräte in der Detektion von Wolken übereinstimmen. Dazu werden Bedeckungsgrade aus den Messergebnissen der Instrumente bestimmt und für einzelne Forschungsflüge gegenübergestellt. Dabei ergeben sich erhebliche Unterschiede in der Wolkendetektion. Mögliche Ursachen für Unterschiede in Bezug auf den Bedeckungsgrad werden in dieser Arbeit herausgearbeitet um die Instrumente besser vergleichen zu können. Als eine Hauptursache werden die unterschiedlichen Auflösungen der Messgeräte identifiziert, die bei einer direkten Gegenüberstellung von specMACS mit WALES und specMACS mit SMART berücksichtigt werden können. Eine große Rolle spielen auch die unterschiedlichen Wolkenerkennungsmethoden besonders in Bezug auf die beiden Wolkenspektrometer specMACS und SMART. Der mit dem HAMP Radar bestimmte Bedeckungsgrad hängt sehr von der Größe der Wolkentröpfchen ab und das Lidar WALES reagiert sehr sensitiv auf kleinste Wolkenpartikel und auch Aerosole.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Wolken	3
2.2	Strahlung	5
2.2.1	Strahlungsgrößen	6
2.2.2	Strahlungsgesetze	6
2.2.3	Streuung	9
2.2.4	Strahlungstransportgleichung	10
2.2.5	Oberflächenreflexion	11
3	Methoden und Messgeräte	13
3.1	Das Wolkenpektrometer specMACS	13
3.2	Das Spektrometer SMART	15
3.3	Das Lidar WALES	16
3.4	Das HALO Microwave Package HAMP	16
3.5	Der Wolkenbedeckungsgrad	17
3.6	Mögliche Ursachen für Unterschiede im Bedeckungsgrad	18
4	Ergebnisse	21
4.1	Der Forschungsflug RF06 am 19.08.2016	21
4.2	Der Forschungsflug RF03 am 12.08.2016	31
4.3	Der Forschungsflug RF07 am 22.08.2016	33
5	Zusammenfassung und Diskussion	37
	Literaturverzeichnis	39
	Abbildungsverzeichnis	41
	Tabellenverzeichnis	43
	Danksagung	45

1 Einleitung

Wolken sind etwas selbstverständliches und doch ein faszinierendes Naturphänomen. Bei unaufmerksamer Betrachtung wirken sie statisch, jedoch bei genauerem Beobachten fällt erst auf wie dynamisch und variabel Wolken sind. Bisher sind noch nicht alle Wolkenprozesse vollständig erforscht, da neben der Dynamik innerhalb einer Wolke und hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität, Wolken mit Strahlung vielfältig wechselwirken. Wolken wurden im fünften IPCC Assessment Report als der größte Unsicherheitsfaktor für die Bestimmung des Energiehaushalts der Erde genannt (Stocker et al., 2013). Daher erfordern diese eine genauere Betrachtung. Wie in Abb. 1.1 dargestellt ist, dringt solare Strahlung in die Atmosphäre ein. Diese wird von der Atmosphäre, den Wolken und der Erdoberfläche absorbiert und reflektiert. Ein Teil der Strahlungsenergie geht auf der Erde in Verdunstungswärme über. Auf diese Weise entsteht Konvektion. Luft steigt auf und kühlt dabei ab, wodurch es zur Wolkenbildung kommen kann und der Atmosphäre latente Wärme zugeführt wird. Bei der Absorption von Strahlung nimmt die Atmosphäre Wärme auf, die als thermische Strahlung wieder emittiert wird. Die Wolken und die Erdoberfläche emittieren ebenfalls thermisch und kühlen dabei ab.

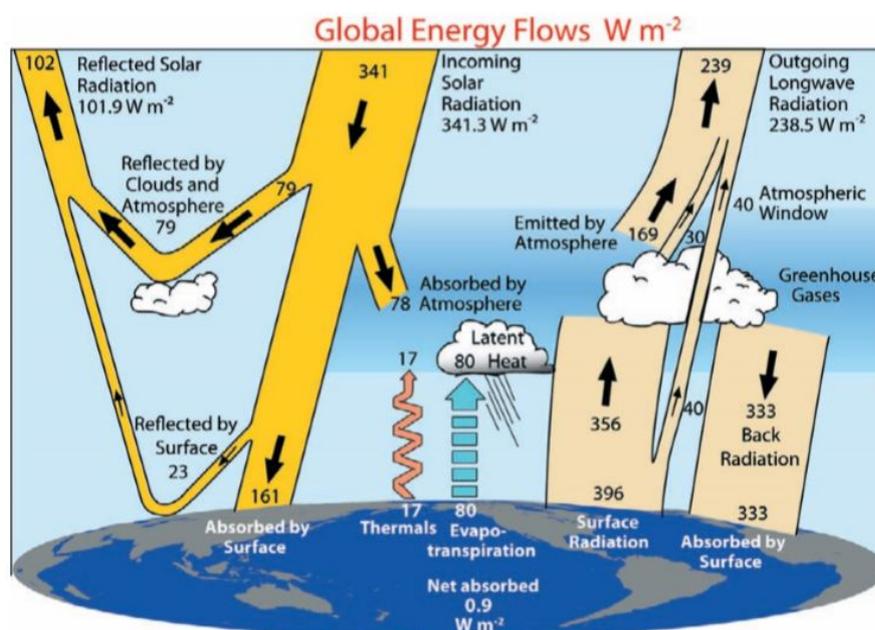


Abbildung 1.1: Das Energiebudget der Erde für März 2000 bis Mai 2001 angegeben in $W m^{-2}$ (Trenberth et al., 2009)

1 Einleitung

Wolken absorbieren und reflektieren solare Strahlung, emittieren thermisch und beeinflussen somit die Strahlungsbilanz der Erde. Damit hat die Solarstrahlung einen großen Einfluss auf die Entstehung und Weiterentwicklung einer Wolke und treibt die Dynamik der Atmosphäre an. Andererseits beeinflussen Wolken über ihren Einfluss auf die Strahlungsbilanz das aktuelle Klima. Mehr Informationen über mikro- und makrophysikalische Eigenschaften der Wolken kann eine bessere Einschätzung ihrer Klimawirkung geben. Um die Kopplung zwischen Wolken und Klima besser zu verstehen, startete am 8. August 2016 die NARVAL-II-Mission (Next generation Aircraft Remote-sensing for Validation studies) mit einem Transferflug des Forschungsflugzeugs HALO (**H**igh **A**ltitude and **L**ong Range Research Aircraft) von Oberpfaffenhofen nach Barbados. An Bord der HALO waren unter anderem zwei Wolkenspektrometer specMACS und SMART, das Lidar WALES und das HALO Microwave Package HAMP Radar. Ziel dieser Arbeit ist es, die Fernerkundungsmessgeräte in Bezug auf ihre Wolkendetektion gegenüber zu stellen. Der daraus entstehende Wolkenbedeckungsgrad wird über einen bestimmten Flugabschnitt der jeweiligen Instrumente berechnet und dem der anderen Geräte gegenübergestellt .

Im folgenden Kapitel 2 werden physikalische Grundlagen eingeführt, die für das Verständnis der Wechselwirkung zwischen Wolken und Strahlung wichtig sind. Im Kapitel 3 werden die Messgeräte vorgestellt, die in dieser Arbeit miteinander verglichen werden. Und es wird Bezug auf deren Verfahren zur Wolkenerkennung genommen. Anschließend werden im Kapitel 4 die aus den Messungen bestimmten Bedeckungsgrade der einzelnen Messinstrumente für verschiedene Flüge und kleinere Flugabschnitte miteinander verglichen um den Ursachen für auffällige Unterschiede auf den Grund zu gehen. Abschließend gibt Kapitel 5 eine kurze Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden physikalische Grundlagen von Wolken und Strahlung sowie Strahlungsgesetze und Streutheorien erläutert, welche die Wechselwirkung der Strahlung mit Atmosphären- und Wolkenbestandteilen beschreiben.

2.1 Wolken

Das Kapitel orientiert sich, sofern nicht anders gekennzeichnet, an [Wallace and Hobbs \(2006\)](#) und [Kraus \(2007\)](#).

Ansammlungen kleiner Wassertröpfchen bzw. Eiskristallen in der Atmosphäre werden als Wolken bezeichnet. Damit sich eine Wolke bilden kann, muss es zunächst zur Kondensation von dem in der Atmosphäre vorhandenen Wasserdampf kommen, wodurch Tröpfchen entstehen. Dies geschieht beim Aufsteigen von Luft zum Beispiel an Gebirgen oder durch erwärmte Luftmassen. Während des Aufsteigens von Luft, kühlt diese trockenadiabatisch -9.8 K/km ab, bis die Lufttemperatur dem Taupunkt gleicht. Der Taupunkt ist dabei die Temperatur, bei der Partialdruck e des Wasserdampfes den Sättigungsdampfdruck e^* erreicht bzw. übersteigt. Der Sättigungsdampfdruck bezeichnet den Druck, bei dem die Evaporationsrate der Kondensationsrate von Wassermolekülen an der Tropfenoberfläche gleicht. Zu diesem Zeitpunkt ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt bezüglich einer ebenen Wasserfläche und ihre relative Feuchte f beträgt 100%.

$$f = \frac{e}{e^*} \quad (2.1)$$

Jedoch kann die Kondensation von Wasserdampf nicht ohne Weiteres beginnen. Der Grund hier liegt in der Erhöhung des Sättigungsdampfdruckes über konvexe Oberflächen, was durch den Kelvin-Effekt erklärt wird. Womit kleinste, gebundene Tropfen gleich wieder verdunsten da $e < e^*_{w,konv}$. Erst wenn ein kritischer Radius r_{krit} überschritten wurde, ist der Sättigungsdampfdruck e^* über der Oberfläche klein genug, damit gleich viele Wasserdampfmoleküle an ihm kondensieren wie verdunsten. Um spontane Tröpfchenbildung, auch homogene Nukleation genannt, zu erreichen, wird eine relative Feuchte von mehreren hundert Prozent benötigt. Jedoch kommt es in der Atmosphäre mithilfe von heterogener Kondensation bereits bei einer relativen Luftfeuchte von etwa 100% zur Wolkenbildung. Dies geschieht, indem sich Wasserdampfmoleküle an Aerosolenpartikeln anlagern, wodurch der Sättigungsdampfdruck verkleinert wird. Man spricht dabei von Wolken-Kondensationskeimen (englisch: Cloud Condensation Nuclei, CCN). Aerosolpartikel sind kleine feste oder flüssige Partikel in der Atmosphäre. Mit Hilfe dieser Partikel wird der Kelvin-Effekt umgangen, da diese bereits einen gewissen Grundradius besitzen, wodurch eine deutlich niedrigere Übersättigung nötig ist. Bei wasserlöslichen Aerosolen,

2 Grundlagen

die sich nach und nach durch das angelagerte Wasser auflösen, wird die Kondensation auch noch auf andere Weise erleichtert. Da der Sättigungsdampfdruck über einer Mischung in der eine Substanz aufgelöst wurde, geringer ist als über reinem Wasser, verringert sich dieser. Dieser Effekt wird auch der Raoult-Effekt genannt. Zusammen mit dem Kelvin-Effekt ergibt sich die Köhlerkurve, aus der r_{krit} folgt. Der Wachstumsprozess wird durch den Aufstieg in der Wolke und die damit verbundene Abkühlung durch weitere Kondensation von Wasserdampf gefördert. Die Wassertröpfchen können dann durch Koaleszenz an Größe gewinnen, indem die Partikel kollidieren und sich durch die Zusammenstöße vereinen. Auf diese Weise entstehen größere Niederschlagspartikel. Dieser Prozess findet häufig in warmen Wolken statt, die dadurch gekennzeichnet sind, dass Wasser nur in flüssiger Form vorkommt. Ein weiterer Vorgang ist der Bergeron-Findeisen-Prozess, der in unterkühlten Mischwolken stattfindet. Dieser hilft besonders in den mittleren Breiten bei der Bildung größerer Niederschlagspartikel. Der Wasserdampf diffundiert dabei von flüssigen Tröpfchen zu festen Eisteilchen, da der Sättigungsdampfdruck über Wasser größer ist als über Eis. Auf diese Weise können die Eispartikel mithilfe von Wassertropfen wachsen. Eis-Mischwolken bilden sich ab einer Temperatur von 0° Celsius. Reine Eiswolken entstehen in kalter, mit Wasserdampf übersättigter Luft, in der das Frieren von Wassertropfen durch homogene Nukleation ohne Kondensationskeimen zwischen -41°C und -35°C stattfindet. In Anwesenheit von Kondensationskeimen können sich hingegen schon bei -10°C durch Resublimation von Schneeflocken bilden. Dabei geht der Wasserdampf direkt in den gefrorenen Zustand über.

Nach Howard (1803) werden Wolken, wie in Tabelle 2.1 dargestellt, nach ihren Höhen klassifiziert:

- niedrige Wolken: Cumulus (Cu), Stratocumulus (Sc), Stratus (St) und Cumulonimbus (Cb) sind niedrige Wolken, die aus Wassertröpfchen und teilweise auch aus Eispartikeln bestehen.
- mittelhohe Wolken: Altocumulus (Ac), Altostratus (As) und Nimbostratus (Ns) sind mittelhohe Wolken, die meist aus Wassertröpfchen oder auch Eispartikeln bestehen.
- hohe Wolken: Cirrus (Ci), Cirrocumulus (Cc) und Cirrostratus (Cs) sind hohe Wolken, bestehend aus Eispartikeln.

	Polare Region	Mittlere Breiten	Tropen
Niedrige Wolken	0-2 km	0-2 km	0-2 km
Mittelhohe Wolken	2-4 km	2-7 km	2-8 km
Hohe Wolken	3-8 km	5-13 km	6-18 km

Tabelle 2.1: Wolkenklassifikation nach Howard (1803)

Neben der vertikalen Wolkenklassifikation ist für die Beschreibung von Wetter- und Klimaentwicklungen die horizontale Verteilung der Wolken besonders wichtig. Der Wolkenbedeckungsgrad gibt an, wie groß der Anteil des Himmels ist, der insgesamt mit Wolken bedeckt ist. Es handelt sich dabei also um eine zweidimensional definierte Größe, die

vor allem in Bezug auf Strahlung eine große Rolle spielt und durch Methoden der Fernerkundung messbar ist. Da Wolken jedoch dreidimensional sind, hängt der Wolkenbedeckungsgrad sehr von der Perspektive und vor allem von dem Auflösungsvermögen eines messenden Instruments ab. Um auf die unterschiedlichen Methoden der Fernerkundung eingehen zu können, werden im Folgenden die Grundbegriffe der Strahlung erläutert, die gewissermaßen den Informationsträger der Fernerkundung darstellt.

2.2 Strahlung

In der Physik versteht man unter Strahlung den Transport von Energie und deren Ausbreitung in Form von Wellen oder Teilchen. Man spricht dabei von dem Wellen-Teilchen-Dualismus, da ein Teil sich wellenmechanisch, der andere Teil quantenmechanisch beschreiben lässt. Dieses Kapitel orientiert sich im Wesentlichen an Fu (2006).

Bei der elektromagnetischen Strahlung handelt es sich um ein Spektrum unterschiedlicher Wellentypen, die nach ihrer Wellenlänge λ bzw. Frequenz ν charakterisiert werden (Abb. 2.1). Über Wellenlänge und Frequenz einer elektromagnetischen Welle wird die Lichtgeschwindigkeit c und deren Betrag im Vakuum definiert :

$$c = \lambda\nu = 299.792.458 \frac{m}{s} \quad (2.2)$$

Die Wellenlänge wird meistens in Mikrometer ($1\mu m = 10^{-6}m$) oder Nanometer ($1nm = 10^{-9}m$) angegeben. Die Frequenz ν besitzt die Einheit Hertz $Hz = s^{-1}$. Üblicherweise wird das Spektrum in einen solaren Spektralbereich (kurzwellige Strahlung, $\lambda < 4\mu m$) und in den Spektralbereich der terrestrischen oder auch thermischen Strahlung (langwellig, $\lambda > 4\mu m$) eingeteilt. Das solare Spektrum umfasst dabei das UV (Ultra Violett), das sichtbare Licht und das nahe IR (Infrarot), wie in Abb. 2.1 zu sehen ist. Das terrestrische Spektrum enthält die langwellige Abstrahlung der Erde im thermischen IR.

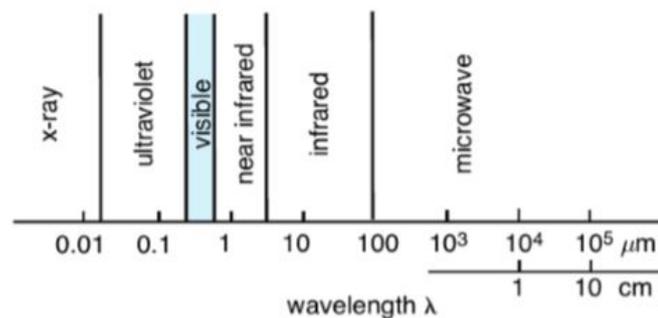


Abbildung 2.1: Das elektromagnetische Spektrum abhängig von der Wellenlänge λ (Fu, 2006)

2.2.1 Strahlungsgrößen

Im Folgenden sollen die wichtigen Strahlungsgrößen nach [Liou \(2002\)](#) und [Fu \(2006\)](#) erläutert werden. Die mit der Strahlung transportierte Energie betrachtet man als Energie pro Fläche und Zeit, sodass man von einem Strahlungsstrom spricht. Die Strahlungsenergie Q gibt die Gesamtenergie eines Körpers an, die er durch elektromagnetische Strahlung abgibt. Die Strahlungsleistung Φ ist definiert als Strahlungsenergie dQ pro Zeit dt :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.3)$$

Die Bestrahlungsstärke E (oft bezeichnet als Irradianz) ist der Strahlungsfluss $d\Phi$, der auf eine ebene Fläche dA trifft:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{dQ}{dt dA} \quad (2.4)$$

Der Anteil an Strahlungsleistung $d\Phi$ der von einem Punkt eines Körpers innerhalb eines bestimmten Raumwinkels $d\Omega$ abgegeben wird, wird durch die Strahlintensität I ausgedrückt :

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.5)$$

Der Raumwinkel $d\Omega$, angegeben in Steradian [sr], beschreibt dabei den Anteil des betrachteten Raums und ist zusammen mit dem Zenitwinkel θ und dem Azimutwinkel φ folgendermaßen definiert :

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2.6)$$

Die Strahldichte L (Radianz) beschreibt die transportierte Energie, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung pro Zeiteinheit auf eine Fläche dA aus einem infinitesimalen Raumwinkel $d\Omega$ trifft:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cos\theta d\Omega} \quad (2.7)$$

Spektrale Größen beziehen sich nur auf die Strahlung bei einer Wellenlänge, daher kann jede der Größen auch spektral definiert werden. Die spektrale Strahldichte L_λ ist dann zum Beispiel definiert als:

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad (2.8)$$

2.2.2 Strahlungsgesetze

Um die Wechselwirkung von Strahlung mit der Atmosphäre besser verstehen zu können, werden in diesem Kapitel, die wichtigsten Strahlungsgesetze dargestellt. Dabei wird sich im Wesentlichen an [Zinth and Zinth \(2013\)](#) und [Thomas and Stamnes \(1999\)](#) orientiert.

Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz

Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Absorptions- und Emissionsvermögens eines Körpers. Das Absorptionsvermögen ist das Verhältnis von

Größe	Definition	Einheit
Strahlungsenergie Q		J
Strahlungsleistung Φ	$\frac{dQ}{dt}$	W
Bestrahlungsstärke E	$\frac{dQ}{dA dt}$	$\frac{W}{m^2}$
Strahldichte L	$\frac{d^2\Phi}{dA \cos\theta d\Omega}$	$\frac{W}{m^2 \text{sterad}}$

Tabelle 2.2: Überblick der wichtigsten Strahlungsgrößen in Anlehnung an Mayer (2009)

absorbierter Strahlungsleistung zur einfallenden Strahlungsleistung.

Ein Schwarzer Körper ist per Definition ein Körper der bei allen Wellenlängen vollständig absorbiert, also kein Licht reflektiert. Er emittiert die so aufgenommene Energie vollständig im Thermischen. Vollständige Emission bedeutet, dass ein Körper maximale Strahlung emittiert, die bei seiner Temperatur möglich ist. Ein weißer Körper dagegen, dessen Absorptionsvermögen im gesamten Spektralbereich gleich Null ist, reflektiert alle Strahlung. Ein grauer Körper absorbiert ein Teil der einfallenden Strahlung und emittiert daher weniger als ein Schwarzer Körper gleicher Temperatur. Das Kirchhoffsche Gesetz besagt, dass die Emissionsvermögen E eines Körpers bei gegebener Wellenlänge gleich seinem Absorptionsvermögen A ist. Nach Kirchhoff (1860) gilt somit für den Absorptionskoeffizienten k_{abs} und den Emissionskoeffizienten k_{em} im thermischen Gleichgewicht:

$$k_{abs} = k_{em} \quad (2.9)$$

Das Plancksche Strahlungsgesetz

Die emittierte, spektrale Strahldichte eines schwarzen Körpers folgt dem Planckschen Strahlungsgesetz (Planck, 1901):

$$B_{Planck}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B\lambda T}\right) - 1} \quad (2.10)$$

Dabei sind h das Plancksche Wirkungsquantum, k_B die Boltzmannkonstante und c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. In Abb. 2.2 sind die sogenannten Planck-Kurven zu sehen, deren Maxima der Emission sich bei höheren Temperaturen zu einer höheren Strahldichte und zu einer geringeren Wellenlänge verschieben. Leitet man nun das Plancksche Strahlungsgesetz nach der Wellenlänge λ ab, so erhält man als Extremwert λ_{max} , der den Scheitelpunkt der jeweiligen Planck-Kurve angibt, bei der die Emission des Strahlers mit

2 Grundlagen

der Temperatur T maximal ist. Diese Temperaturabhängigkeit der Lage des Maximums wird durch das Wiensche Verschiebungsgesetz beschrieben :

$$\lambda_{max} \cdot T = 2897,8 \mu\text{mK} \quad (2.11)$$

Die Maxima der spektralen Verteilungen verschieben sich demnach mit niedrigeren Temperaturen zu größeren Wellenlängen, wie in Abb. 2.2 gut zu erkennen ist.

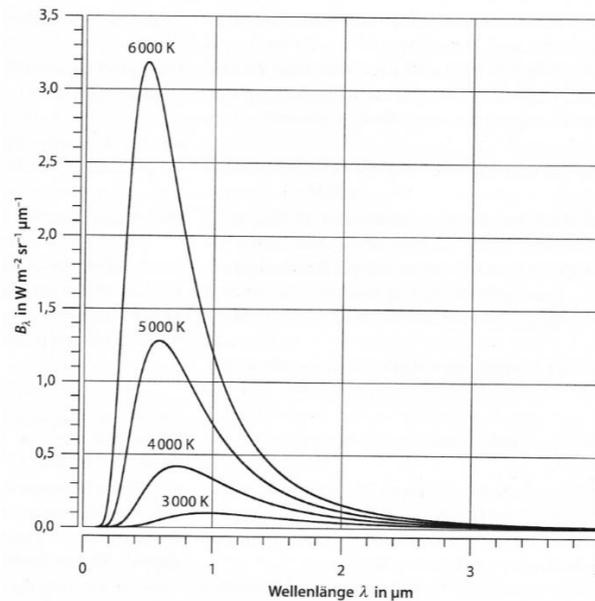


Abbildung 2.2: Plancksche Emissionskurven in doppelt-linearem Maßstab (Kraus, 2007)

Das Lambert-Beersche Gesetz

Die optische Dicke τ gibt an, wie viel Strahlung auf dem Weg von a nach b durch ein Medium verloren geht, sie ist also ein Maß dafür, wie sehr die Strahlung durch die Schicht abgeschwächt wird. Sie ergibt sich aus Integration des Extinktionskoeffizienten k_{ext} und des zurückgelegten Weges s:

$$\tau = \int_a^b k_{ext}(s) ds. \quad (2.12)$$

Der Extinktionskoeffizient $k_{ext} = k_{abs} + k_{sca}$ setzt sich aus der Summe von Absorptions- k_{abs} und Streukoeffizienten k_{sca} zusammen.

Die Abschwächung der Strahlungsintensität dI beim Durchgang durch ein Medium der Konzentration n und der Weglänge ds , wird durch das Lambert-Beersche Gesetz in differentieller Form beschrieben :

$$dL = -L \cdot n \cdot \sigma_{ext} \cdot ds \quad (2.13)$$

mit dem Extinktionsquerschnitt $\sigma_{ext} = \sigma_{abs} + \sigma_{sca}$ als Summe aus Absorptions- und Streuquerschnitts. Mithilfe der optischen Dicke τ und $k_{ext} = n \cdot \sigma_{ext}$, lässt sich nach Integration

über den Lichtweg s , lässt sich 2.13 schreiben :

$$L(s) = L_0 \cdot \exp(-\tau) \quad (2.14)$$

Das Verhältnis zwischen durchgehender und einfallender Strahlung an einem Medium wird als Transmission T bezeichnet:

$$T = \frac{L}{L_0} \quad (2.15)$$

2.2.3 Streuung

Neben der Emission und Absorption der Strahlung in der Atmosphäre, die in den vorherigen Kapiteln angesprochen wurden, kann es zur Streuung an atmosphärischen Bestandteilen kommen, die nun nach Fu (2006) erläutert werden soll. Bei der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen kann es zur Wechselwirkung mit Teilchen in der Atmosphäre kommen, sodass sie von ihrer ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt werden. Ein Maß für den Anteil gestreuter Strahlung, die in entgegengesetzte Richtung zur einfallenden Strahlung gestreut wird, ist der Rückstreuquerschnitt σ_{back} .

Die Art der Streuung hängt von dem Verhältnis der Größe des Partikels und von der Wellenlänge λ der einfallenden Strahlung ab. Zur Beschreibung wird der dimensionslose Größenparameter x eingeführt:

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2.16)$$

r bezeichnet den Radius des streuenden Teilchens. Dabei werden drei Streuregime abhängig von dem Wert des Größenparameters x unterschieden :

- für $x \ll 1$ gilt die *Rayleigh-Streuung*. Der Durchmesser des Teilchens ist klein gegenüber der Wellenlänge der einfallenden Strahlung. Der Rückstreuquerschnitt σ_{back} ist proportional zu λ^{-4} .
- für $x \approx 1$ lassen sich die Streueigenschaften mithilfe der *Mie-Theorie* beschreiben. Die Teilchengröße entspricht dann in etwa der auftreffenden Wellenlänge des Teilchens. Der Rückstreuquerschnitt hängt nach Zinth and Zinth (2013) nur noch schwach von λ ab. Durch die geringe Wellenlängenabhängigkeit, erscheint das streuende Medium im sichtbaren Licht weiß, was das Weiß der Wolken erklärt. Der Mie-Bereich wird durch konstruktive und destruktive Interferenzen im Rückstreuquerschnitt charakterisiert, was in Abb. 2.3 als gedämpfte Oszillation (Mie, 1908) zu erkennen ist.
- für $x \gg 1$ ist das Teilchen sehr groß gegenüber der einfallenden Strahlung und optische Eigenschaften können aus der *geometrischen Optik* abgeleitet werden. Für den optischen Bereich ist der Rückstreuquerschnitt σ_{back} unabhängig von der Wellenlänge λ und gleich der geometrischen Fläche πr^2 .

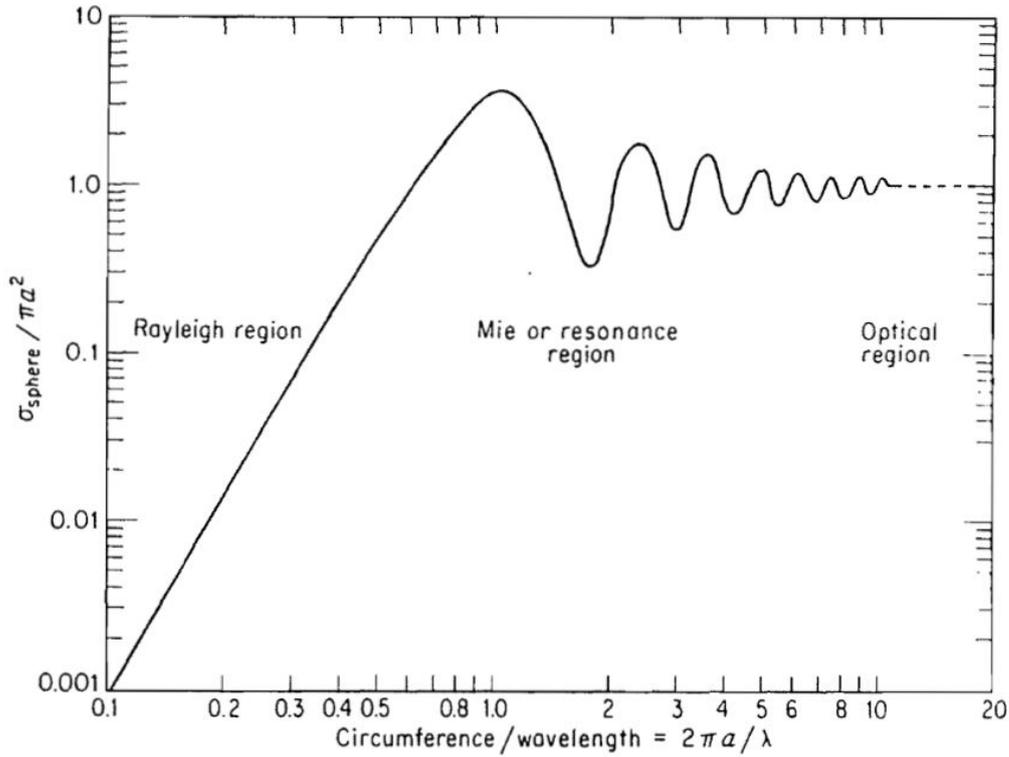


Abbildung 2.3: Normierte, effektive Rückstreulfläche $\frac{\sigma_{back}}{\pi a^2}$ in Abhängigkeit des Größenparameters x , mit a =Radius r (Skolnik, 1980)

2.2.4 Strahlungstransportgleichung

Der Strahlungstransport beschreibt die Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung in einem Medium. Die Atmosphäre ist ein Medium bestehend aus verschiedenen Komponenten (Gase, Wolken aus Wassertröpfchen und Eiskristallen, Aerosolpartikel), die den Strahlungstransport komplex machen. Nach Chandrasekhar (1960) wird dieser durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\frac{1}{k_{ext}} \cdot \frac{dL}{ds} = -L + \frac{\omega_0}{4\pi} \cdot \int_{4\pi} p(\Omega', \Omega) \cdot L(\Omega') d\Omega' + (1 - \omega_0) \cdot B(T) \quad (2.17)$$

mit der Einfachstreuabsorption $\omega_0 = \frac{k_{sca}}{k_{ext}}$, die den Anteil gestreuter Strahlung an der Extinktion angibt und der Streuphasenfunktion $p(\Omega', \Omega)$, die der Wahrscheinlichkeit entspricht, dass die Strahlung von Ω' nach Ω gestreut wird. Die Strahlungstransportgleichung beschreibt nach Mayer (2009) also die Änderung der Strahldichte dL durch ein kleines Volumenelement entlang ds anhand folgender Terme:

- $-k_{ext} \cdot L$ gibt die Abschwächung der einfallenden Strahlung durch Extinktion an.

- $k_{ext} \cdot \frac{\omega_0}{4\pi} \cdot \int_{4\pi} p(\Omega', \Omega) \cdot L(\Omega') d\Omega' = \frac{k_{sca}}{4\pi} \int_{4\pi} p(\Omega', \Omega) \cdot L(\Omega') d\Omega'$ gibt an, wie viel an Strahldichte durch Streuung aus dem gesamten Raumwinkel $d\Omega'$ in die betrachtete Richtung innerhalb des betrachteten Raumwinkel $d\Omega$ gewonnen wird.
- $k_{ext}(1 - \omega_0) \cdot B_{Planck}(T) = k_{abs} \cdot B_{Planck}(T)$ ist die Strahlungsemission durch das Volumenelement.

2.2.5 Oberflächenreflexion

Die Reflexion und Absorption von Strahlung am Boden ist sehr komplex, jedoch spielt während der NARVAL-II Kampagne nur die einfachste Variante davon, nämlich die Reflexion an Wasser, eine Rolle. Die Sonnenreflexion (englisch: *sun-glint*) entsteht durch Reflexion des Sonnenlichts auf der Wasseroberfläche. Folgende Erklärung lehnt an [Cox and Munk \(1954\)](#).

Die Sonnenreflexion entsteht als Resultat der spiegelnden Reflexion an einer Wasseroberfläche. Bei einer glatten Wasseroberfläche, würde die Oberfläche wie ein Spiegel fungieren und es wäre ein heller Reflexionsspunkt auf dem Wasser zu erkennen. Unter realen Bedingungen gibt es aber keine perfekt glatte Wasseroberfläche und die Verteilung der Oberflächenorientierungen der vorhandenen Wellen hängt vor allem von der Windgeschwindigkeit ab. Der Bereich der Reflexion ist dann nicht mehr scharf sondern verschwommen und verbreitert. Aufgrund der nicht glatten Oberfläche wird das Sonnenlicht in diverse Richtungen gestreut und erreicht den Beobachter nicht mehr in gebündelter Form.

Diese Reflexion spielt vor allem bei der Wolkenfernerkundung mit passiven solaren Methoden eine große Rolle, da die reflektierende Wasseroberfläche kaum oder gar nicht mehr von der Reflexion der Wolken zu unterscheiden ist.

3 Methoden und Messgeräte

In diesem Kapitel werden die Messgeräte, die während der NARVAL-II Kampagne an Bord der HALO waren vorgestellt und deren Bestimmung der Wolkenbedeckung genauer erläutert. Da die Wolkendetektion für die jeweiligen Messgeräte recht unterschiedlich abläuft, werden hier erste mögliche Unterschiede im Grad der Bedeckung ermittelt.

3.1 Das Wolkenspektrometer specMACS

Bei specMACS (cloud spectrometer of the **M**unich **A**erosol **C**loud **S**canner, Abb. 3.1) handelt es sich um ein abbildendes Wolkenspektrometer des Meteorologischen Instituts München der Ludwig-Maximilians Universität. Es verfügt über zwei Hyperspektralkameras im Wellenlängenbereich von 400 bis 2500 nm. Die VNIR-Kamera (Visible and Near InfraRed) deckt dabei den Bereich von 417 - 1016 nm, die SWIR (Short Wave Infra-Red) den Bereiche von 1015 - 2496 nm ab. specMACS hat daher eine hohe spektrale und räumliche Auflösung. Die spektrale Bandbreite der VNIR beträgt 2,5 bis 4 nm, die der SWIR 7,5 bis 12 nm. Das Blickfeld eines Pixels (englisch: Instantaneous Field of View, IFOV) der VNIR beträgt 1,4 bis 2,0 mrad, der der SWIR 1,8 bis 3,8 mrad. Das gesamte Sichtfeld (englisch: field of view, FOV) der SWIR beträgt $35,5^\circ$, das der VNIR $32,7^\circ$. Bei der SWIR-Kamera, die für diese Arbeit relevant ist, handelt es sich um eine Zeilenkamera mit nur einer räumlichen Dimension von 320 Pixel. Bei einer Flughöhe von 10 km ergibt sich eine räumliche Auflösung von 18m entlang und 38m senkrecht zur Flugrichtung. Durch die Bewegung des Flugzeugs des eindimensionalen Sensors senkrecht zur Ausrichtung der Zeilenkamera entsteht ein zweidimensionales Bild mit einer Breite von 6,4km. Bei der hier diskutierten Kampagne NARVAL-II war zusätzlich als drittes Element eine 2D-RGB Kamera integriert. Diese und weitere technische Daten können [Ewald et al. \(2016\)](#) entnommen werden.



Abbildung 3.1: specMACS VNIR und SWIR Sensoren (Foto: Tobias Kölling, Meteorologisches Institut München)

3 Methoden und Messgeräte

Die Wolkenerkennung in den specMACS Daten nach [Gödde \(2018\)](#) basiert zunächst auf Helligkeit, da Wolken heller als die Wasseroberfläche sind. Dies funktioniert vor allem in Bereichen ohne Sonnenreflexion. Da aufgrund von Sonnenreflexion die Wasseroberfläche ebenfalls hell erscheinen kann, werden zusätzlich die Wasserdampfabsorptionsbanden betrachtet. Der Wasserdampfgehalt in niedrigeren Schichten nahe der Wasserfläche ist besonders hoch (siehe [Abb. 3.2](#)). Wenn keine Wolken vorhanden sind und die Strahlung auf Meereshöhe reflektiert wird, ist die Transmission entlang des Strahlpfades somit geringer. Strahlung, die an Wolken reflektiert wird, weist eine höhere Transmission auf. Mithilfe des Lambert-Beerschen Gesetz kann aus den gemessenen Strahldichten und dem Sonnen- bzw. Beobachtungszenitwinkel nun τ berechnet werden. Zusätzlich wird ein Referenzwert τ_{ref} manuell festgelegt, der den Wert von τ angibt, der der Höhe der Meeresoberfläche entspricht und mit dem geprüft wird, ob das berechnete τ aus den Messungen kleiner als τ_{ref} ist und auf diese Weise eine Wolke detektiert wurde. Nachdem der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre variiert, muss der Referenzwert τ_{ref} , der Wolken von der reflektierenden Oberfläche unterscheidet, nach gemessenen Wasserdampfdaten angepasst werden. In [Abb. 3.3](#) ist ein specMACS SWIR-Ausschnitt der NARVAL-II Kampagne zusammen mit den von specMACS detektierten Wolken dargestellt.

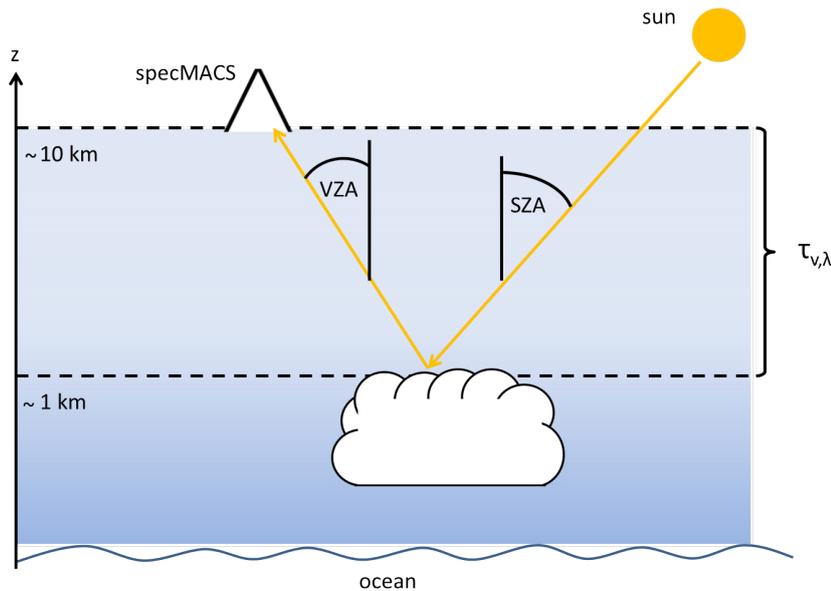


Abbildung 3.2: Illustration der Messung der Wasserdampfabsorption: Solare Strahlung tritt unter dem Sonnenzenitwinkel SZA in die Atmosphäre ein, wird an einer Wolke reflektiert und erreicht specMACS unter dem Beobachtungszenitwinkel VZA; die blaue Schattierung gibt den Wasserdampfgehalt an; $\tau_{v,\lambda}$ bezeichnet die vertikale, optische Dicke bei einer bestimmten Wellenlänge zwischen der Wolken-Oberkante und dem Messinstrument specMACS ([Gödde, 2018](#))



Abbildung 3.3: specMACS SWIR Daten-Ausschnitt mit farbigen Konturen der Wolken, die von specMACS detektiert wurden

3.2 Das Spektrometer SMART

Das Spektrometer SMART (**S**pectral **M**odular **A**irborne **R**adiation measurement sys**T**em) misst die nach oben und nach unten gerichtete Bestrahlungsstärken E und die aufwärts gerichteten Strahldichten L . Um das gesamte solare Spektrum abzudecken, misst SMART die Strahldichte mit zwei separaten Spektrometern in ähnliche Bereichen wie specMACS. Das eine Spektrometer misst den sichtbaren Bereich (VIS) $\lambda = 300 - 1000\text{nm}$ und das andere den infraroten Bereich (IR) $\lambda = 900 - 2200\text{nm}$. SMART hat ein Sichtfeld (FOV) von $2,1^\circ$. Das heißt, das Sichtfeld von SMART besteht nur aus einem Pixel. Durch die Flugbewegung entsteht daraus ein Datenstreifen. Das FOV (=IFOV) ist entlang der Flugrichtung um den Faktor 21 und senkrecht dazu um den Faktor 10 größer als ein einzelnes specMACS Pixel. Diese und weitere Daten können [Wendisch et al. \(2001\)](#) und [Ehrlich et al. \(2008\)](#) entnommen werden.

Die Erkennung von Wolken erfolgt unter Verwendung der spektralen Messung von SMART. Bei Flügen über dem Ozean wird dazu das Verhältnis R der aufwärts gerichteten Radianz L_λ von 858 nm zu 658 nm verwendet. Dies erfolgt analog zur Wolkenmaske, welche bei MODIS ([Ackerman et al., 1998](#)) angewendet wird.

$$R = \frac{L_{858\text{ nm}}}{L_{656\text{ nm}}} \quad (3.1)$$

R ist also über dem Ozean kleiner im Vergleich zu Wolken, da $L_{656\text{ nm}}$ über dem Ozean größer als $L_{858\text{ nm}}$ ist. Für Wolken nähern sich die Werte von $L_{656\text{ nm}}$ und $L_{858\text{ nm}}$ an. Aufgrund des geringen Zenitwinkels der Sonne sind die Messungen häufig von der Sonnenreflexion beeinflusst. Anders als bei der MODIS-Klassifizierung wird deshalb kein fester Grenzwert für das Verhältnis R von L_λ verwendet. Vielmehr wird eine Mittelung an das Hintergrundstrahlungs-Verhältnis R vorgenommen, welche sich durch die aktuelle Messsituation ergibt. Diese wurde durch ein gleitendes Mittel von R über einen Zeitraum von 10 Minuten bestimmt. Die gewählte Zeit für die Mittelung stellt einen Kompromiss zwischen falscher Klassifizierung, durch einen zu geringen Grenzwert und kurze Mittelungszeit, und einer Nichtdetektion von Wolken, durch einen zu hohen Grenzwert und lange Mittelungs-

zeit dar. Das gleitende Mittel wird im Folgenden als R_{mitt} bezeichnet:

$$R_{\text{mitt}}(t) = \frac{1}{N_{\text{Messungen}}} \sum_{t_i=t-5 \text{ min}}^{t+5 \text{ min}} R(t_i) \quad (3.2)$$

Prinzipiell basiert die Bestimmung der Wolkenmaske auf der kurzzeitigen Variabilität von R gegenüber des gemessenen Hintergrundstrahlungsverhältnis R_{mitt} . Sobald die Bedingung $R > R_{\text{mitt}} + 0.08$ erfüllt ist, wird eine Messung als bewölkt klassifiziert. (Quelle: persönliche Mitteilung Kevin Wolf, Uni Leipzig)

3.3 Das Lidar WALES

Bei WALES (**W**ater vapor **L**idar **E**xperiment in **S**pace) handelt es sich um das vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betriebene DIAL (**D**ifferential **A**bsorption **L**idar). Es ist ein aktives Fernerkundungsgerät. Nach [Werner and Streicher \(2005\)](#) werden bei einem DIAL zwei kurze Laserpulse bei zwei verschiedenen Wellenlängen entlang einer Wasserdampfabsorptionslinie ausgesendet und als von Teilchen gestreutes Licht wieder empfangen. Die Wellenlängen werden dabei so gewählt, dass eine im Zentrum der Absorptionslinien liegt und stark vom Wasserdampf in der Atmosphäre absorbiert wird. Diese Wellenlänge wird auch als Online-Wellenlänge bezeichnet. Die zweite Wellenlänge (Offline-Wellenlänge) liegt am Rand der Absorptionslinie und wird daher nur schwach oder gar nicht absorbiert. Das zurückgestreute Signal beider Wellenlängen unterscheidet sich aufgrund unterschiedlicher starker Absorption durch Wasserdampf, was auch als differentielle Absorption bezeichnet wird. Aus dieser Differenz kann die Wasserdampfkonzentration und Aerosol- und Wolkeneigenschaften bestimmt werden.

Das Lidar WALES nutzt sogar vier Wellenlängen unterschiedlicher Wasserdampfabsorption ([Wirth et al., 2009](#)). Drei Online- und eine Offline-Wellenlänge im Bereich der 935 nm Wasserdampf-Absorptionslinie, da jede der genutzten Wellenlängen in unterschiedlichen Höhenbereichen besonders stark absorbiert wird.

Die Wolkenerkennung von WALES basiert auf dem gemessenen Rückstreusignal. Dabei wird das Rückstreuverhältnis (englisch: backscatter ratio, BSR) zwischen total zurück gestreutem Licht und nur durch Aerosol zurück gestreutem Licht, das direkt mit WALES gemessen werden kann, berechnet. Das heißt, je höher das Rückstreuverhältnis, desto größer ist der Partikelgehalt (Tropfen oder Aerosol). Wolken werden dann mithilfe eines Grenzwertes des Rückstreuverhältnisses $\text{BSR}=20$ herausgefiltert. (Quelle: Manuel Gutleben, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR))

3.4 Das HALO Microwave Package HAMP

In Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Meteorologie, der Universität Köln, der Universität Hamburg, des DLR und der Meteorologischen Messtechnik (Metek) GmbH

wurde das **HALO Microwave Package** (HAMP) entwickelt (Mech et al., 2014). Es handelt sich dabei um ein aktiv messendes Wolkenradar und drei passiv messende Mikrowellenradiometermodule.

Das Wolkenradar MIRA-36 ist ein gepulstes, Ka-Band Doppler-Radar, das aktiv gebündelte, elektromagnetische Wellen bei einer Frequenz von 35,5 GHz aussendet. Der Vorteil des Ka-Bandes gegenüber üblichen 94 GHz oder des W-Bandes ist, die reduzierte Dämpfung des Signals durch Regen, was bei dieser Frequenz jedoch eine relativ große Antenne erfordert, das bei der Größe der HALO aber keine Probleme bereitet. Als Ausgabeparameter liefert das Radar neben der Radarreflektivität ein Dopplerspektrum, die Dopplergeschwindigkeit, die Spektralbreite und das lineare Depolarisationsverhältnis. Die sogenannte Halbwertsstrahlbreite oder Öffnungswinkel, vergleichbar dem FOV der passiven Sensoren, beträgt $0,6^\circ$.

Das Mikrowellenradiometersystem wird in dieser Arbeit nicht mit den anderen Instrumenten verglichen. Es besteht aus drei Modulen, dem HALO-KV, HALO-119 90 und HALO-183, deren Frequenzen so gewählt sind, dass bestimmte Bereiche des Mikrowellenspektrums abgedeckt werden.

Die Wolkendetektion des Radars wird aus der gemessenen Radarreflektivität abgeleitet. Das rohe Radarsignal wird üblicherweise gefiltert. Dabei werden die Signale, die gegenüber dem konstanten Hintergrundrauschen klein sind, entfernt. Die dann noch vorhandenen Signale geben schließlich an, dass eine Wolke detektiert wurde. Das heißt, sobald ein Messwert vorhanden ist, wird dem Pixel der Wert 1 zugeordnet (=Wolke), ansonsten hat das Pixel den Wert 0. Danach wurde die Maske noch weiterverarbeitet, indem Messlücken interpoliert und die Wolken morphologisch geschlossen wurden, d.h. wenn zwei Wolken sehr dicht nebeneinander gemessen wurden (ca 1 Sekunde \approx 200m), dann wurden sie verbunden. Dies wurde gemacht, da die Wolkenfetzen oft zu größeren danebenliegenden Wolken gehören, die zusammen hängen, und dies im Sichtfeld des Radars nicht aufgenommen werden konnte. (Quelle: persönliche Mitteilung, Heike Konow, Uni Hamburg)

3.5 Der Wolkenbedeckungsgrad

Um die gemessenen Bedeckungsgrade der Instrumente miteinander vergleichen zu können, werden zunächst die Ergebnisse, die mithilfe des Bestimmungsverfahrens für Wolken erstellt wurden, in eine Wolkenmaske umgewandelt. Eine Wolkenmaske gibt an, zu welchem Zeitpunkt und in welchem Pixel eine Wolke detektiert wurde. Sie besteht im Wesentlichen aus Nullen und Einsen. Jedes Pixel wird dabei einem Wert zugeordnet: wurde eine Wolke detektiert besitzt dieses Pixel den Wert 1, ein wolkenfreies Pixel hat den Wert 0. Der Wolkenbedeckungsgrad (englisch: cloud fraction, CF) wird dabei nach einer Standard-Methode berechnet. Die CF ist das Verhältnis aus der Anzahl an Wolken-Pixeln und der Gesamtzahl an Pixeln einer Bildszene.

3.6 Mögliche Ursachen für Unterschiede im Bedeckungsgrad

Im Folgenden werden mögliche Ursachen in Bezug auf den Bedeckungsgrad erläutert, die aufgrund von unterschiedlichen Eigenschaften der Messgeräte hervorgerufen werden können.

Korrektur der Blickrichtungsunterschiede

Um mögliche Unterschiede in den Bedeckungsgraden erklären zu können, müssen bei den Messgeräten vor allem die Blickrichtungen und Sichtfelder betrachtet werden. Einen Überblick verschafft Grafik 3.4. Die positive Abszissenachse zeigt in die Flugrichtung und im Ursprung liegt der Nadir der HALO bezüglich der Position von HAMP und WALES. Das SMART blickt mit 2° gegenüber WALES und HAMP nach hinten. Die specMACS SWIR blickt mit $2,6^\circ$ gegenüber WALES nach vorne und das zentrale räumliche Pixel liegt um $0,55^\circ$ in Flugrichtung nach links verschoben

Durch die unterschiedlichen Blickrichtungen kommt es zu einer Zeitdifferenz bei der Detektion der selben Wolke zwischen zwei Messgeräten. Die benötigten Größen für die Korrektur des Zeitunterschiedes sind in Abb. 3.5 dargestellt. Der Abstand d zwischen HALO und Wolke wird mithilfe der Flugzeugdaten und den gemessenen Wolkenoberkanten des Lidars ermittelt und korrigiert. Die Abschnitte Δx_1 und Δx_2 werden über den Tangens der jeweiligen Blickrichtung des Messgerätes und den Abstand d berechnet.

Auflösungs- und Sensitivitätsunterschiede

Aufgrund der unterschiedlichen Größen der Sichtfelder (Abb. 3.4) der Messgeräte kommt es zur unterschiedlichen Auflösungen des Bedeckungsgrads. Messgeräte mit einer geringeren Auflösung (d.h. relativ großes FOV) überschätzen bzw. unterschätzen, je nach Sensitivität, bei der Detektion von Wolken, die kleiner als das Sichtfeld eines Pixels sind, den Bedeckungsgrad. Daher spielt die Sensitivität eines Messgerätes ebenfalls eine große Rolle. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 3.6 dargestellt. Auf erster Ebene ist der Unterschied zwischen zwei Messgeräten mit gleicher räumlicher Auflösung dargestellt. Die Unterschiede im Extremfall zwischen hoher und niedriger Sensitivität ergeben dabei zwei komplett unterschiedliche Ergebnisse im Bedeckungsgrad. Der Bedeckungsgrad mit einer hohen räumlichen Auflösung von 33% unterscheidet sich ebenfalls sehr von den beiden geringer aufgelösten Messinstrumenten. Die WALES-Daten, die in dieser Arbeit verwendet werden, wurden auf 1-Sekunde Daten gemittelt. Daher spricht man bei gemittelten Lidardaten auch von einem gemittelten FOV bzw. Footprint. Ein gemitteltes FOV von WALES besteht aus 10 ursprünglichen einzelnen FOVs. specMACS liefert sogar einen zweidimensionalen Bedeckungsgrad senkrecht zur Flugrichtung.

3.6 Mögliche Ursachen für Unterschiede im Bedeckungsgrad

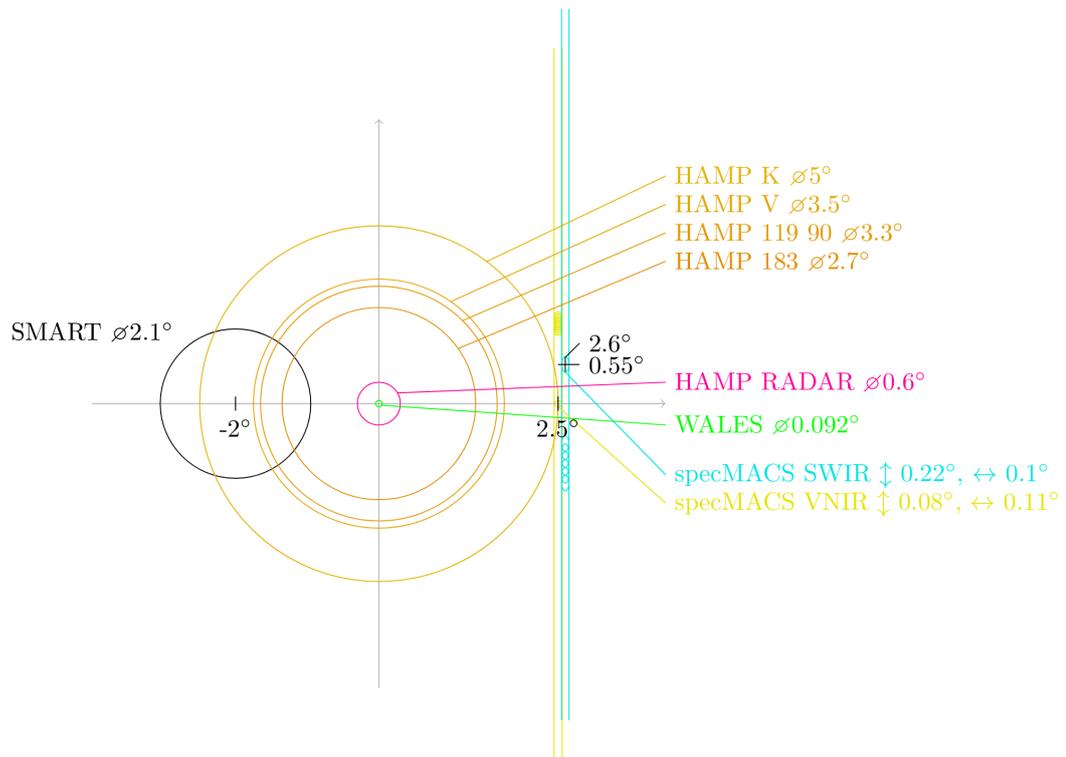


Abbildung 3.4: Blickrichtung und Sichtfeld der Geräte (Tobias Kölling, Meteorologisches Institut München)

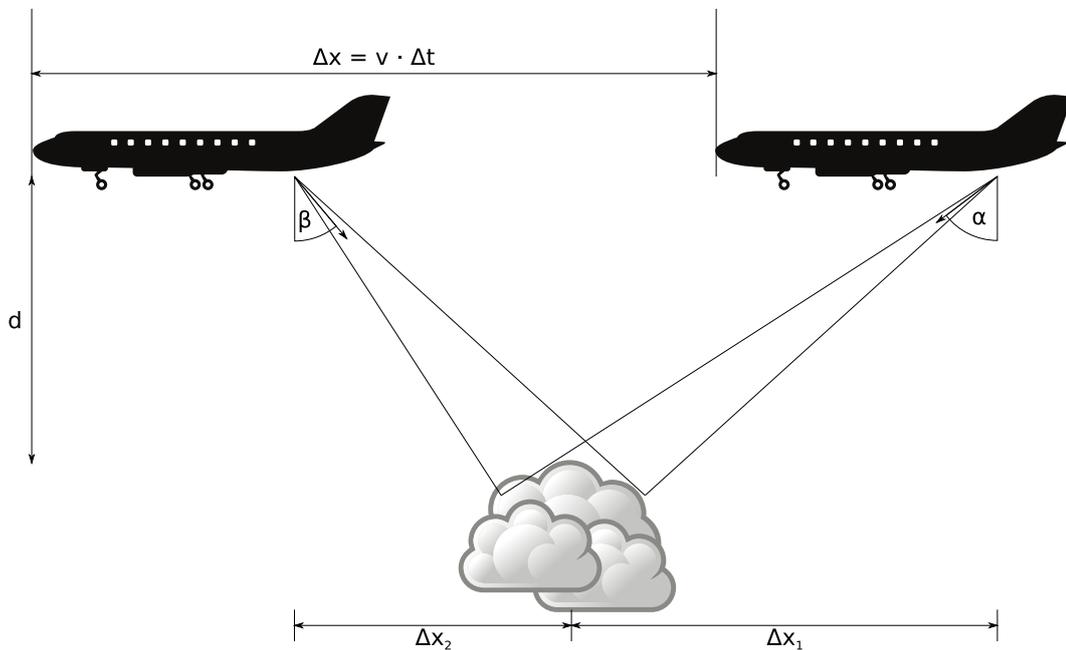


Abbildung 3.5: Zeitdifferenz Δt bzw. Ortsdifferenz Δx bei der Wolkendetektion aufgrund unterschiedlicher Blickrichtungen α und β zweier Messgeräte während des Fluges mit der Fluggeschwindigkeit v

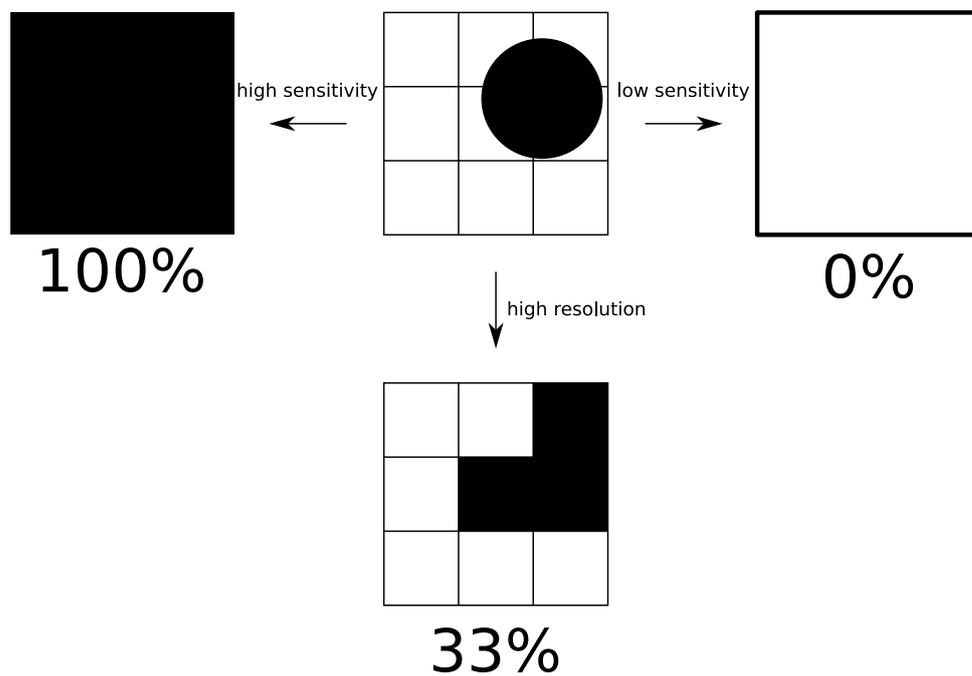


Abbildung 3.6: Illustration zur Veranschaulichung unterschiedlicher Bedeckungsgrade aufgrund von Auflösungs- und Sensitivitätsunterschieden (Tobias Kölling, Meteorologisches Institut München)

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse in Bezug auf den Bedeckungsgrad der verschiedenen Messgeräte der NARVAL-II Kampagne verglichen und erläutert. Die NARVAL II-Mission (Next generation Aircraft Remote-sensing for Validation studies) startete am 8. August 2016 mit einem Transferflug des Forschungsflugzeugs HALO (High Altitude and Long Range Research Aircraft) von Oberpfaffenhofen nach Barbados. Drei Jahre nach der ersten Kampagne NARVAL I, fokussiert sich die zweite Kampagne noch mehr auf das bessere Verständnis der Kopplung von Wolken, Zirkulation und Klima über dem tropischen und subtropischen Ozean. (<https://www.mpimet.mpg.de/kommunikation/aktuelles/imfokus/narval-ii/>) Die Kampagne besteht insgesamt aus zehn Forschungsflügen, von denen drei in dieser Arbeit betrachtet werden. Für diese Flüge werden alle verfügbaren Bedeckungsgraddaten basierend auf den Messungen der Sensoren specMACS, WALES, SMART und HAMP Radar verglichen. In den nachfolgenden Analysen werden vor allem Bedeckungsgrade zwischen specMACS, SMART und WALES betrachtet, da das HAMP Radar kleine Tröpfchen nicht registrieren kann und somit weniger Wolken detektiert. Für anschauliche Vergleiche werden specMACS SWIR-Daten bei einer Wellenlänge von 1610 nm dargestellt.

4.1 Der Forschungsflug RF06 am 19.08.2016

Der Forschungsflug RF06 fand am 19.08.2016 statt und dauert von 12:28 bis 20:52 Uhr UTC. Barbados befindet sich dabei in der Zeitzone *UTC* – 4 Stunden. In Abb. 4.1 ist der Verlauf der Bedeckungsgrade aller zu vergleichenden Messinstrumente dargestellt. Der Gesamtbedeckungsgrad setzt sich nur aus den Strecken zusammen, über die alle Messgeräte gemessen haben. Somit wurden Messlücken einzelner Geräte für einen besseren Vergleich der Gesamtbedeckung berücksichtigt. Dabei ist zu sehen, dass der Gesamtbedeckungsgrad des Spektrometers SMART mit 15,7% am höchsten ist, gefolgt vom Lidar WALES mit 16,9% und specMACS mit 8,1%. Das HAMP Radar detektiert mit 7,7% die wenigsten Wolken. Auffallend im Verlauf ist, dass WALES zusammen mit SMART einen sehr hohen Bedeckungsgrad liefert. Der hohe Bedeckungsgrad des Lidars könnte darauf zurück zu führen sein, dass das Lidar am empfindlichsten auf Partikel reagiert. Aber der große Unterschied zwischen specMACS und SMART erfordert nähere Betrachtung. Das HAMP Radar zeigt einen niedrigen Bedeckungsgrad an.

Um eine genauere Erklärung für Unterschiede zu finden, werden zunächst kleine Abschnitte genauer betrachtet und mit der aufgenommen Sequenz der specMACS SWIR-Daten bei einer Wellenlänge von 1610 nm verglichen. Der Unterschied ist in Abb. 4.2 dargestellt, wobei hier der Bedeckungsgrad pro Minute gemittelt dazu dargestellt ist. Auch im Detail

4 Ergebnisse

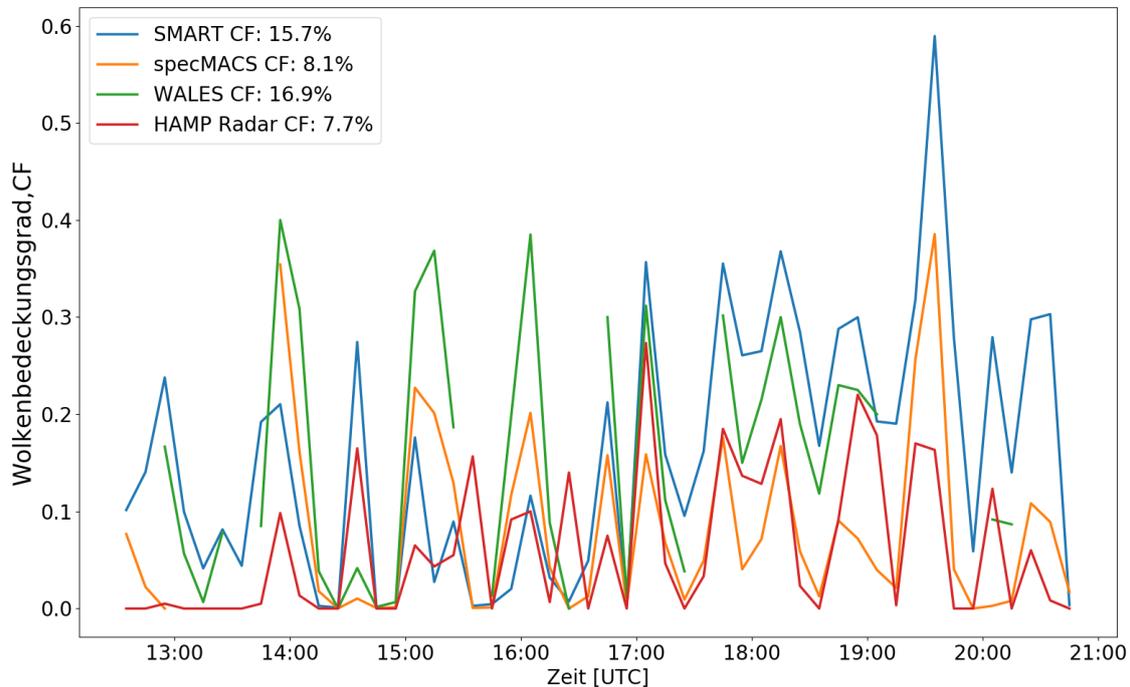


Abbildung 4.1: Verlauf des Wolkenbedeckungsgrads (CF) während des gesamten Flugs RF06 gemittelt über 10 Minuten. In der Legende ist der Gesamtbedeckungsgrad über den gesamten Flug angegeben

liegen die Werte des WALES-Lidars meist wesentlich über den anderen Geräten und die WALES CF ist hier am höchsten. Hier zeigen specMACS und WALES einen ähnlichen Verlauf, obwohl WALES immer über specMACS liegt (Offset). Bei WALES kommt hinzu, dass es nicht nur empfindlich gegenüber Wasserpartikeln ist, sondern auch gegenüber Aerosolen und somit nicht nur Wolken detektiert. SMART hat aufgrund der Sonnenreflexion zur Mittagszeit den geringsten Bedeckungsgrad. Für SMART sind helle Wolken dann kaum noch von der reflektierenden Meeresoberfläche zu unterscheiden. Die Werte des HAMP Radars sind um 15:40 auffallend hoch, obwohl in den specMACS SWIR-Daten keine Wolken zu erkennen sind und auch die anderen Geräte keine Wolken detektieren. In diesem Bereich ist die HALO eine Kurve geflogen, in der das Radar offenbar Probleme mit der Wolkendetektion hatte. Auch zu einem späteren Zeitpunkt in Abb. 4.3 sind erhebliche Unterschiede im Bedeckungsgrad zu erkennen, obwohl die Verläufe relativ ähnlich sind. SMART zeigt hier einen auffallend hohen Gesamtbedeckungsgrad von 32,9 % an. Dieser ist jedoch mit der Methode der Wolkenmaskenerstellung zu erklären. Da die Reflexion der Sonne hier keine große Rolle mehr spielt und der Hintergrund bzw. die Meeresoberfläche recht dunkel erscheint, ist der Unterschied zwischen heller Wolke und der dunklen Meeresoberfläche groß und somit ist SMART sensitiver als für den Zeitraum in Abb. 4.2.

4.1 Der Forschungsflug RF06 am 19.08.2016

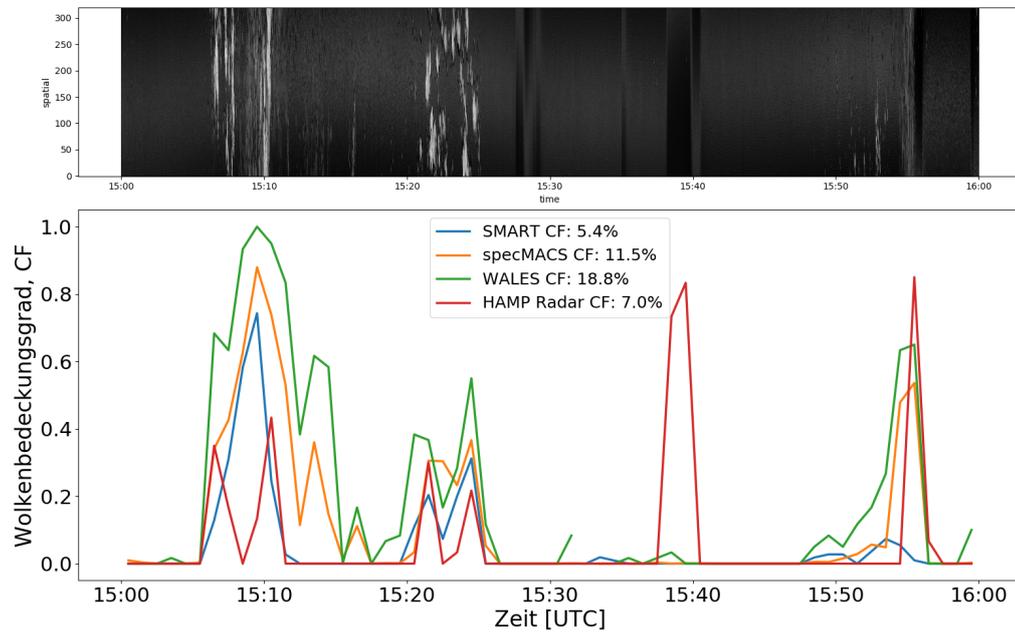


Abbildung 4.2: Oben: Verlauf der specMACS SWIR-Daten von 15:00 bis 16:00 UTC; unten: der zugehörige Verlauf der CF (gemittelt über 60s) für diesen Zeitraum

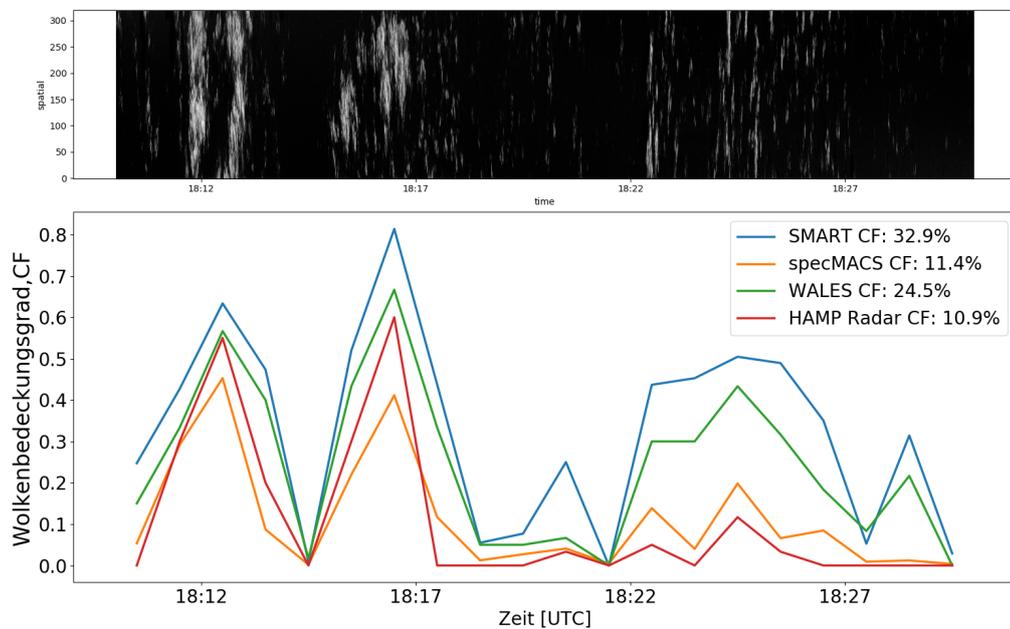


Abbildung 4.3: Oben: Verlauf der specMACS SWIR-Daten von 18:10 bis 18:30 UTC; unten: der zugehörige Verlauf der CF (gemittelt über 60s) für diesen Zeitraum

Für einen noch detaillierteren Vergleich und Erklärung der CF-Unterschiede sind vor allem die Blickrichtung, Blickwinkel und Sichtfelder der Geräte wichtig. Deshalb müssen für genauere Vergleiche vor allem die Sichtfelder und der Zeitunterschied aufgrund unterschiedlicher Blickrichtungen der Geräte berücksichtigt und korrigiert werden (Kapitel 3.6, Abb. 3.4). Um dies zu ermöglichen, werden im Folgenden specMACS mit SMART und specMACS mit WALES direkt verglichen. Dazu wurde mithilfe der HALO-Flugdaten jeweils der Zeitunterschied berechnet und die specMACS-Pixel herausgesucht, die dem zu vergleichenden Blickfeld des jeweiligen Messgeräts entsprechen. Möglich wird diese Analyse, da einerseits das gesamte specMACS FOV $35,5^\circ$, andererseits das specMACS IFOV eines Einzelpixel $0,22^\circ$ senkrecht zur Flugrichtung und $0,1^\circ$ in Flugrichtung groß ist.

Vergleich: specMACS - SMART

Um die hohe Diskrepanz zwischen den beiden Spektrometern zu verstehen, werden im Folgenden specMACS und SMART genauer betrachtet. Dazu wird die Zeitdifferenz korrigiert, die im Kapitel 3.6 angesprochen wurde, und der Bildausschnitt von specMACS herausgesucht, der einem SMART-Pixel entspricht. Dies ist in Abb. 4.4 dargestellt. Die specMACS-CF ist für das jeweilige Pixel angegeben und ein roter Rand um den SMART Bildausschnitt signalisiert, dass das SMART Pixel als bewölkt klassifiziert wurde. Dabei ist zu sehen, dass von specMACS eine größere Wolke detektiert wurde, SMART dagegen zwischenzeitlich keine Wolke mehr sieht. Das liegt daran, dass sich die Variabilität zwischen den Pixeln einer Wolke nicht stark ändert, was aber für die SMART Methode ein wesentliches Kennzeichen von Bewölkung ist. Dies wird auch im Verlauf des Graphen des Bedeckungsgrades in Abb. 4.5 sichtbar. Während specMACS einen durchgehend hohen Bedeckungsgrad einer Wolke anzeigt, wechselt die SMART-CF zwischen 0 und 1. Auf diese Weise kommt auch der hohe Unterschied in der CF in zustande. Ein anderer Fall einer typischen und großen Abweichung ist in Abb. 4.6 und Abb. 4.7 gezeigt. Obwohl beide Geräte diesmal zu gleichen Zeitpunkten Wolken detektieren ist die SMART CF fast doppelt so hoch wie die specMACS CF. In diesem Fall liegt dies an der Auflösung der Pixel der beiden Geräte. Da SMART über das gesamte SMART-Pixel die Bedeckung 0 oder 1 liefert, während specMACS die Details innerhalb eines SMART Pixeln analysieren lässt und daher einen genaueren Wert der CF zwischen 0 und 1 liefern kann. Eine genaue Grenze ab welcher CF SMART die Bedeckung 1 anzeigt, ist anhand der Messwerte nicht zu bestimmen. Dieser Wert schwankt tageszeit-abhängig mit der Beleuchtungssituation wie in Abb. 4.4 und Abb. 4.7 zu erkennen ist. Das Aspektverhältnis der nachfolgenden Ausschnitte kann je nach Anzahl vorliegender Messergebnisse variieren, da aufgrund technischer Vorgänge zur Kalibrierung der Messgeräte kurzzeitig keine Messungen möglich waren. Zusammenfassend kann man sagen, dass Unterschiede in der Bedeckung zwischen specMACS und SMART durch räumliche Auflösungen zu erklären sind. Besonders die Methode der Wolkenerkennung von SMART verursacht große Unterschiede bei größeren Wolken und in Situationen mit Sonnenreflexion.

4.1 Der Forschungsflug RF06 am 19.08.2016

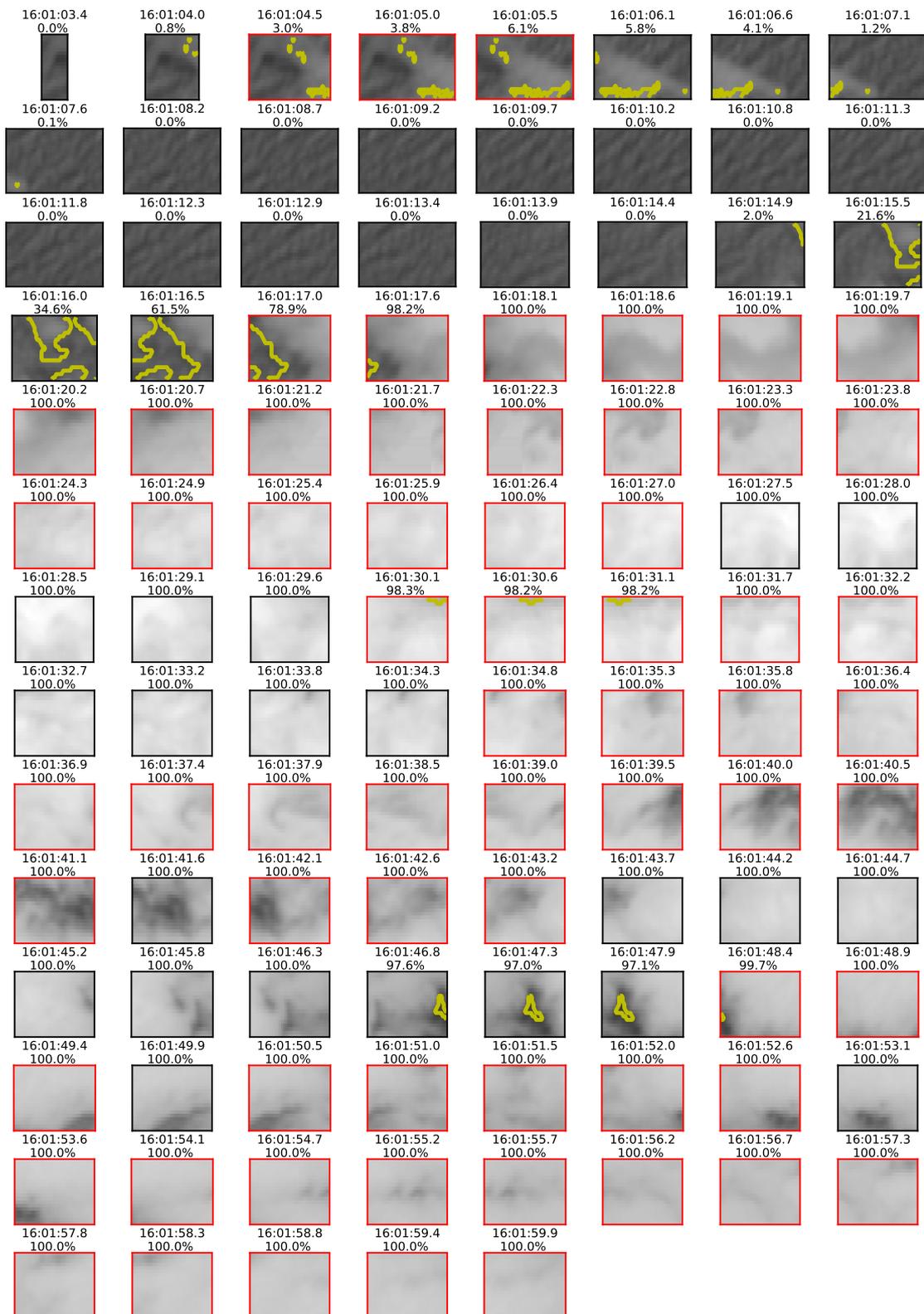


Abbildung 4.4: specMACS SWIR-Daten innerhalb einzelner SMART Pixel von 16:01-16:02 UTC; CF unter der Uhrzeit entspricht der specMACS-CF; rot umrandete Pixel geben an, dass Pixel von SMART als bedeckt (CF=1) klassifiziert wurde

4 Ergebnisse

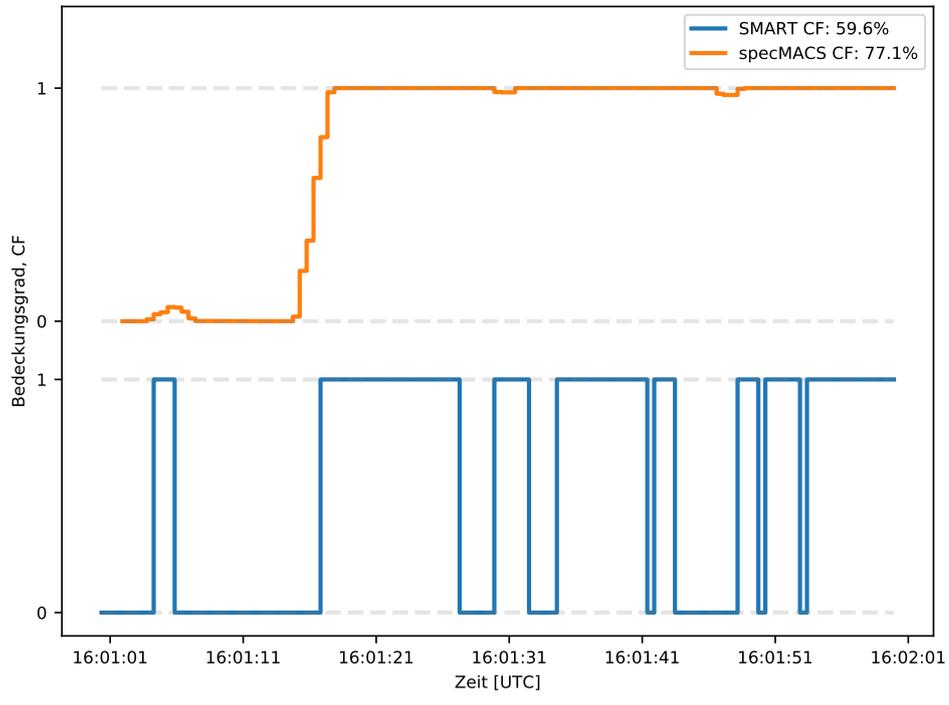


Abbildung 4.5: Der Verlauf der Bedeckung von specMACS innerhalb eines SMART-Pixels von 16:01 bis 16:02 UTC

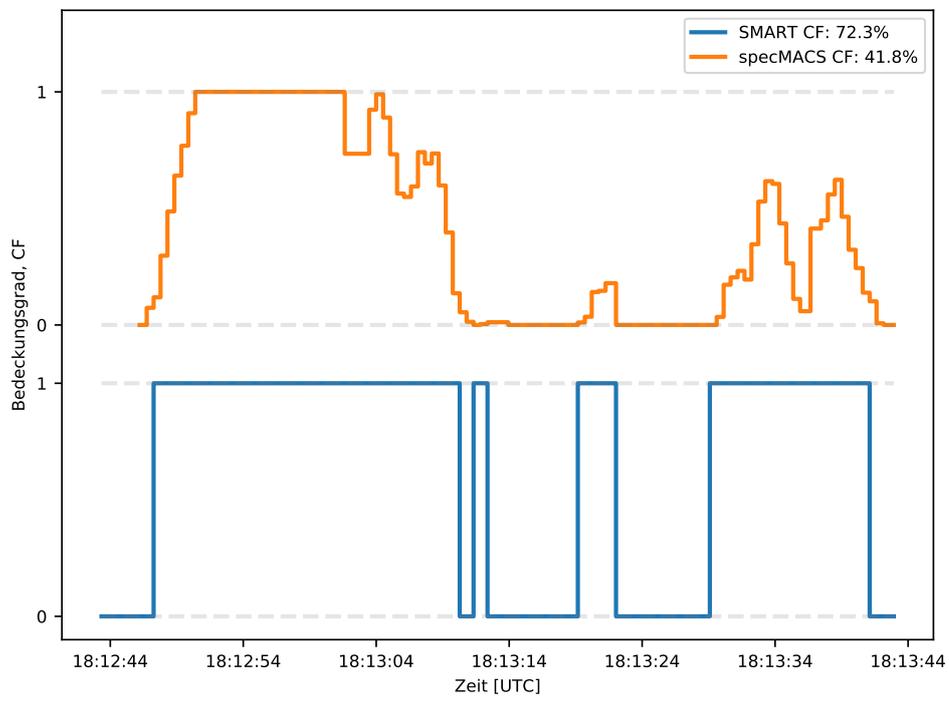


Abbildung 4.6: Der Verlauf der Bedeckung von specMACS innerhalb eines SMART-Pixels von 18:12 bis 18:13

4.1 Der Forschungsflug RF06 am 19.08.2016

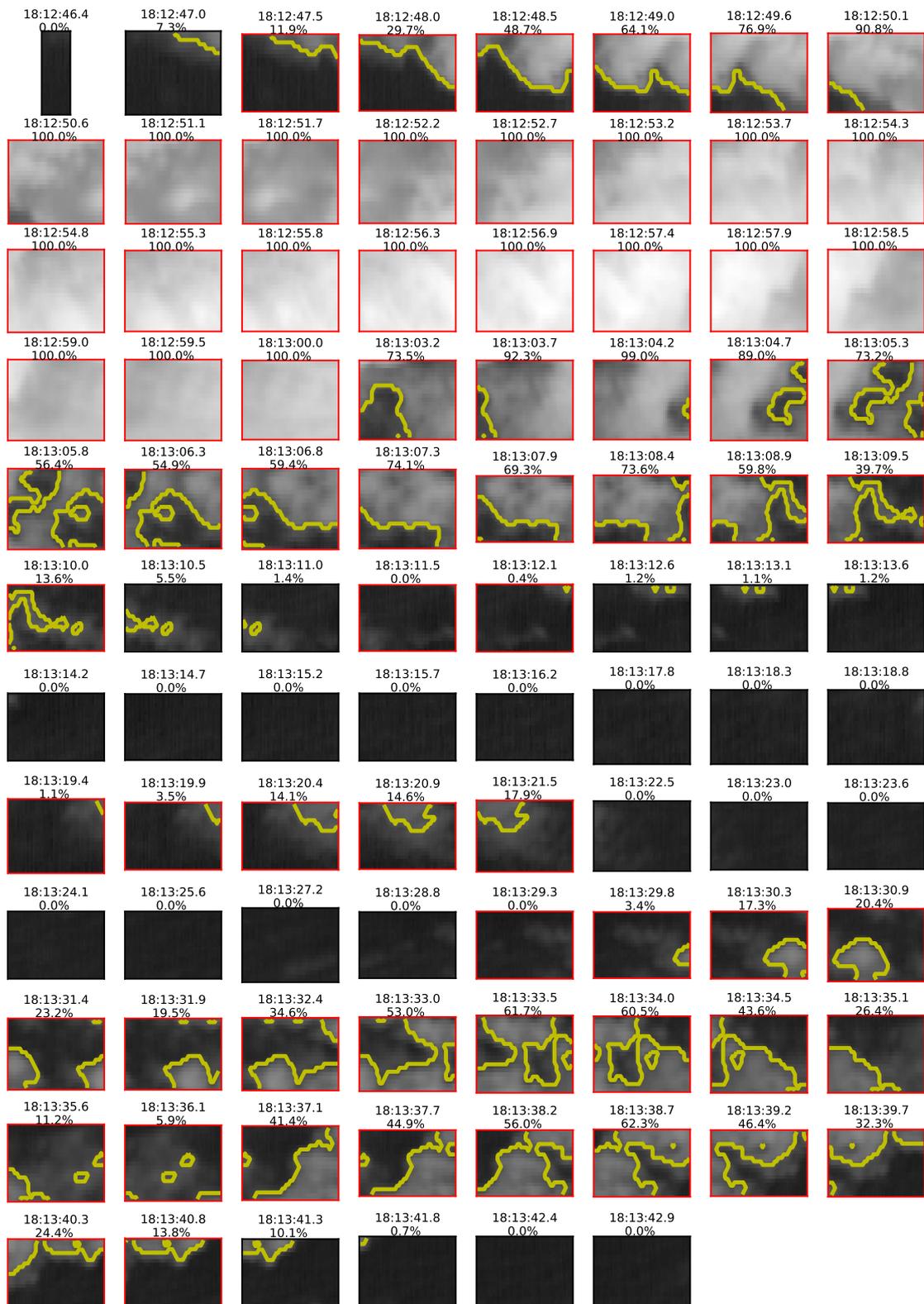


Abbildung 4.7: specMACS SWIR-Daten innerhalb einzelner SMART Pixel von 18:12 bis 18:13 UTC; CF unter der Uhrzeit entspricht der specMACS-CF; rot umrandete Pixel geben an, dass Pixel von SMART als bedeckt (CF=1) klassifiziert wurde

Vergleich specMACS - WALES

Im Folgenden werden Situationen, in denen specMACS und WALES in der CF große Unterschiede aufweisen, genauer betrachtet.

Hier wurden ebenfalls die Zeitdifferenzen und unterschiedlichen FOVs für einen direkten Vergleich korrigiert. Die WALES Footprints bestehen aus mehreren FOVs je $0,092^\circ$, da die Lidardaten auf eine Sekunde-Daten gemittelt wurden. In Abb. 4.8 ist eine Situation mit sichtbarer Sonnenreflexion im FOV dargestellt, weswegen die Pixel sehr hell sind. Beide Geräte detektieren die selben Wolken, was im Verlauf der CF in Abb. 4.9 abzulesen ist. Der höhere Bedeckungsgrad von WALES über den Abschnitt mit 52,6% gegenüber specMACS mit 40,9% kommt hier ausschließlich zustande, da das gemittelte WALES FOV größer als das specMACS-Pixel ist und als vollständig bedeckt bewertet wird. Somit wird die WALES CF überschätzt.

Ein späterer Zeitpunkt ist in Abb. 4.10 dargestellt. Hier ist zu sehen, dass WALES ebenfalls die Wolken detektiert, die mit specMACS erkannt wurden. Vereinzelt hat WALES zusätzlich Wolken detektiert, ohne dass sie von specMACS gemessen wurden, da das Lidar sensitiver auf Teilchen in der Atmosphäre reagiert. Auch der Verlauf Abb. 4.11 zeigt die ähnliche Wolkendetektion beider Messgeräte. Jedoch liegt die WALES-CF mit 45,6% weit über der specMACS-CF mit 21,7%, was auf die Sensitivität des Lidars und die Überschätzung aufgrund der gemittelten FOV-Größe zurückzuführen ist.

Um zu demonstrieren, welchen Einfluss die Überschätzung auf die CF hat, wird im Folgenden die specMACS CF modifiziert. Das bedeutet, das räumliche Auflösungsvermögen wird an WALES angepasst. Nun ähnelt der modifizierte specMACS-Verlauf (*specMACS_{mod}*) stärker dem von WALES und auch der CF-Unterschied verringert sich. Dies ist ebenfalls in Abb. 4.11 dargestellt. Zusammenfassend kann man sagen, dass nur ein Teil der Unterschiede der CF zwischen specMACS und WALES auf die höhere Sensitivität des Lidars zurückzuführen ist, ein großer Teil aber auf die Unterschiede in der räumlichen bzw. zeitlichen Auflösung.

4.1 Der Forschungsflug RF06 am 19.08.2016

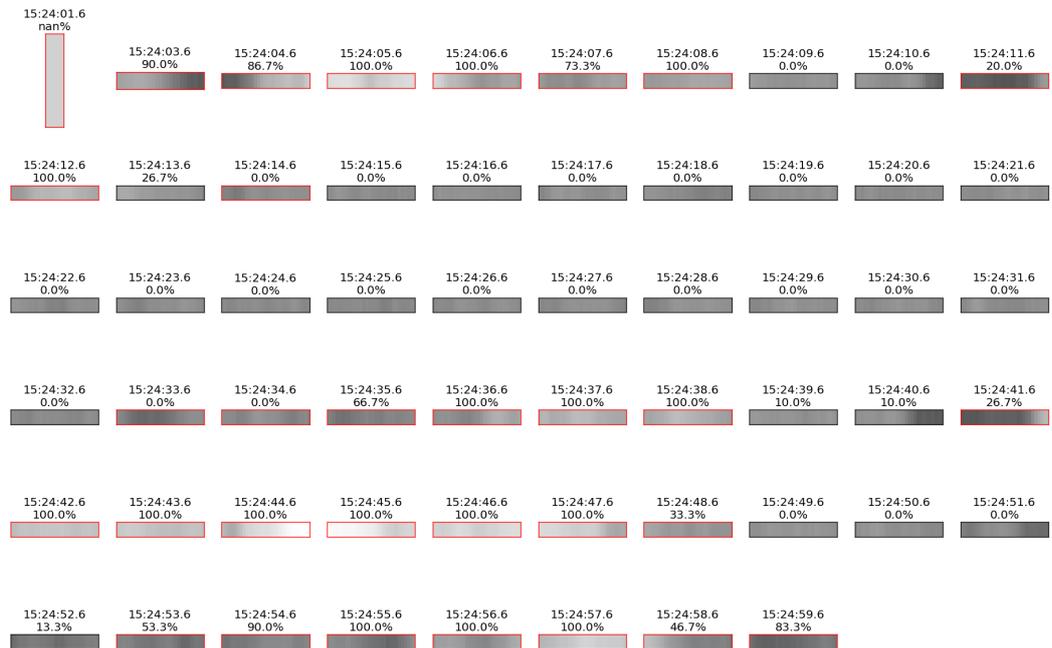


Abbildung 4.8: specMACS SWIR-Daten innerhalb einzelner WALEs Footprints von 15:24-15:25 UTC; CF unter der Uhrzeit entspricht der specMACS-CF; rot umrandete Ausschnitte geben an, dass gemittelte FOV von WALEs als bedeckt (CF=1) klassifiziert wurde

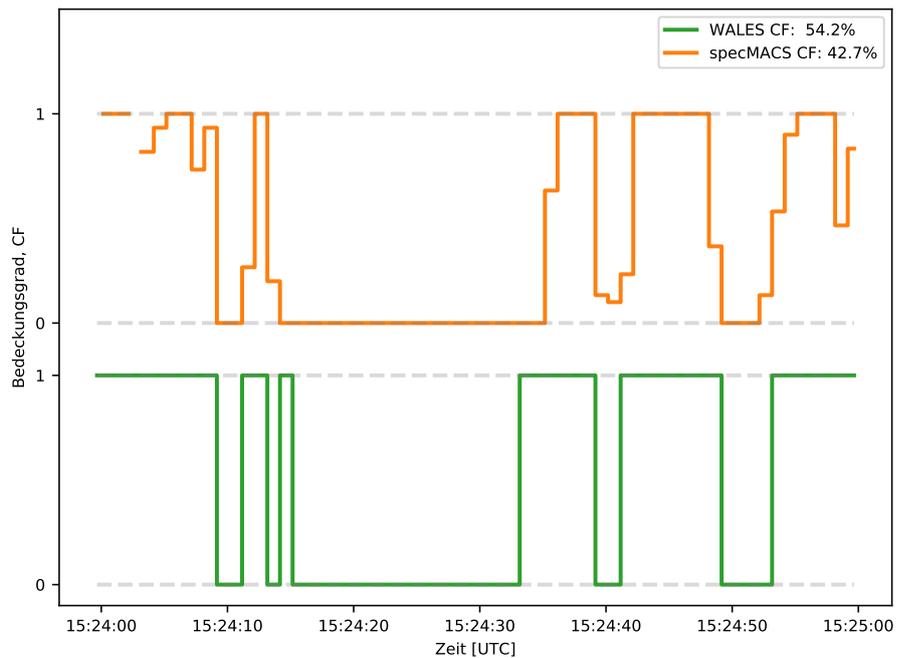


Abbildung 4.9: Der Verlauf des Bedeckungsgrads von specMACS und WALEs von 15:24-15:25 UTC; in der Legende ist die CF des jeweiligen Gerätes über den dargestellten Abschnitt angegeben

4 Ergebnisse



Abbildung 4.10: specMACS SWIR-Daten innerhalb einzelner WALEs Footprints von 18:24-18:25 UTC; CF unter der Uhrzeit entspricht der specMACS-CF; rot umrandete Ausschnitte geben an, dass gemittelte FOV von WALEs als bedeckt (CF=1) klassifiziert wurde

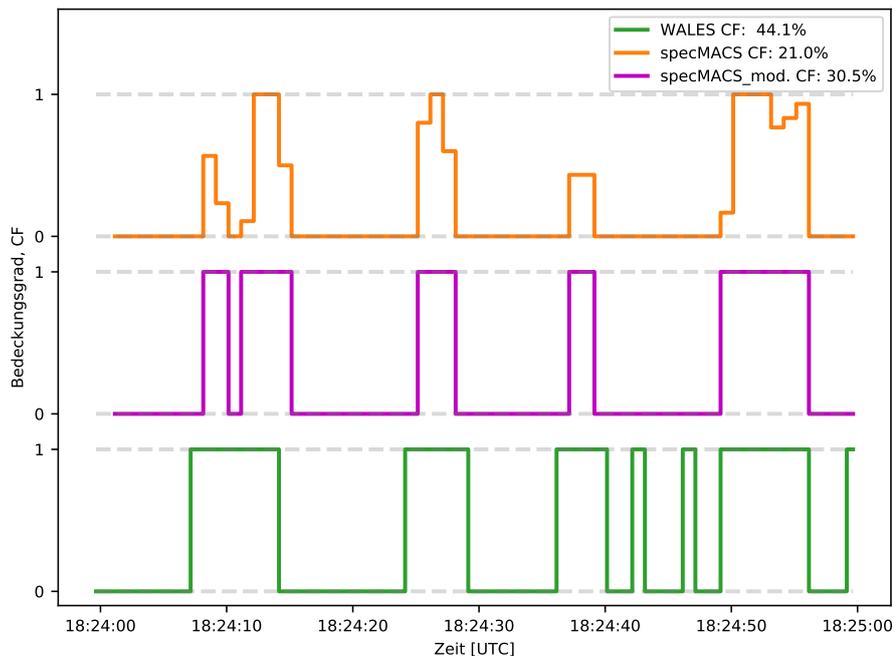


Abbildung 4.11: Der Verlauf des Bedeckungsgrads von 18:24-18:25 UTC; in der Legende ist die CF des jeweiligen Gerätes über den dargestellten Abschnitt angegeben; *specMACS_{mod}* stellt die an WALEs angepasste specMACS CF dar

4.2 Der Forschungsflug RF03 am 12.08.2016

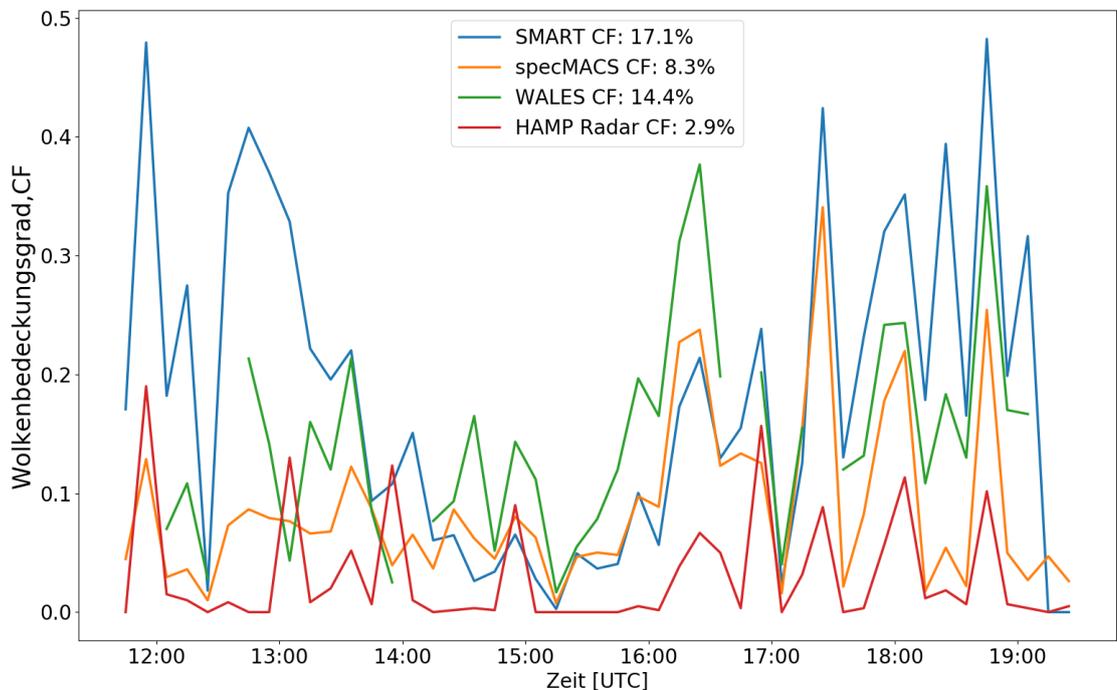


Abbildung 4.12: Der Verlauf des Bedeckungsgrad aller Messgeräte während des RF03 jeweils gemittelt über 10 Minuten

Der Forschungsflug RF03 fand am 12.08.2016 von 11:43 bis 19:37 UTC statt. In Abb. 4.12 ist der Verlauf der Bedeckungsgrade aller Messgeräte und die Gesamtbedeckung während des RF03 dargestellt. Dabei ergeben sich ähnliche Reihenfolgen und Größenordnungen wie im RF06. Die höchste CF hat SMART mit 17,1%, gefolgt von WALES mit 14,4%. SpecMACS misst eine CF von 8,3%. Das HAMP Radar detektiert mit 2,9% die wenigsten Wolken. Auffallend hoch ist wieder der Unterschied in der Gesamtbedeckung zwischen den beiden Spektrometern specMACS und SMART. Die SMART-CF ist ähnlich wie zuvor doppelt so groß wie die specMACS-CF. WALES und SMART liegen ebenfalls wieder am nächsten beieinander. Wie zuvor detektiert SMART vor allem zu Zeiten hohen Sonnenstandes zwischen 14:00 und 16:00 UTC besonders wenig Wolken (Grund vermutlich die Sonnenreflexion wie in Kapitel 2.2.5 gezeigt). Um die relativ großen Unterschiede erklären zu können, werden im Folgenden Detailabschnitte zusammen mit dem specMACS SWIR-Ausschnitt betrachtet.

In Abb. 4.13 ist ein Ausschnitt mit vielen, kleinere Wolken zu sehen, bei denen sich die Bedeckungsgrade sehr unterscheiden. Für das HAMP Radar sind diese relativ kleinen Wolken, die vermutlich aus kleinen Tröpfchen bestehen, kaum messbar und liefern daher eine CF von 0,9%. WALES dagegen reagiert selbst bei kleinen Partikeln sehr empfindlich

4 Ergebnisse

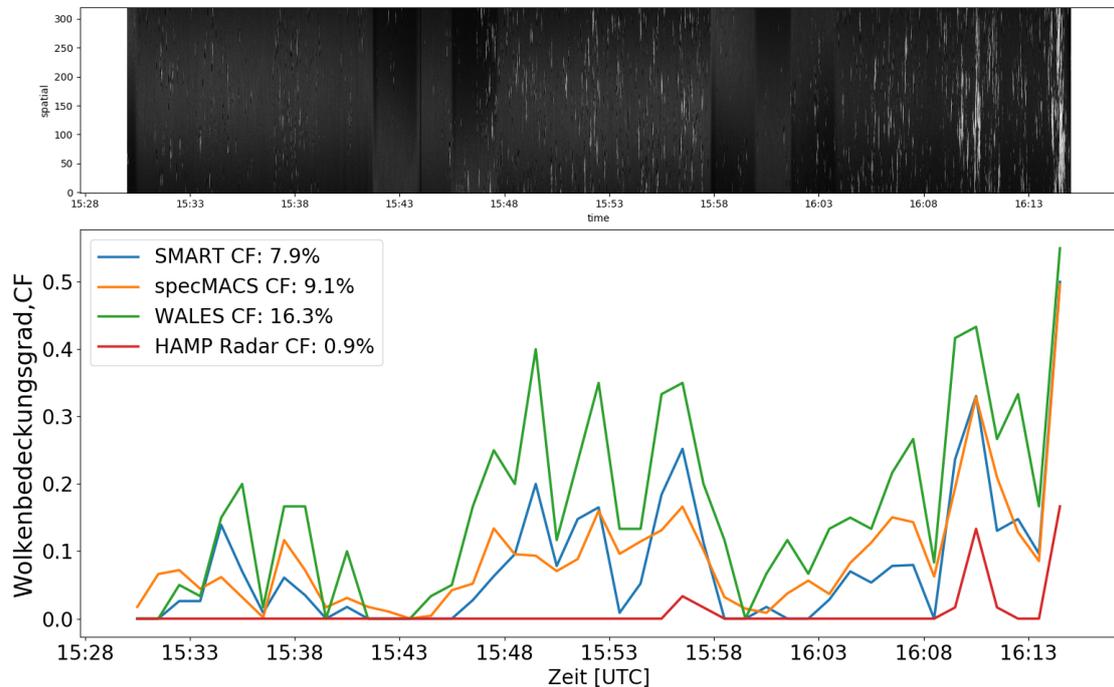


Abbildung 4.13: Oben: Bilderverlauf der specMACS SWIR DATEN von 15:30 bis 16:15 UTC; unten: der zugehörige Verlauf der CF (gemittelt über 60s) für diesen Zeitraum

bei den über eine Sekunde aufgelösten Daten (räumliche Auflösung $\approx 200m$) und misst somit den höchsten Bedeckungsgrad in diesem Abschnitt. Die beiden Spektrometer unterscheiden sich lediglich um 1,2%. Ein späterer Zeitpunkt ist in Abb. 4.14 dargestellt. Gegen 17:53 und 18:03 UTC werden von allen vier Messgeräten mehr Wolken gemessen und es ergeben sie ähnliche CF-Verläufe. Ab 18:08 UTC sind die Unterschiede zwischen den Messgeräten dann plötzlich wieder besonders hoch. In den specMACS SWIR-Daten ist zu sehen, dass in diesem Abschnitt nur vereinzelt kleinere Wolken zu sehen sind. SMART ist zu dieser Uhrzeit besonders empfindlich, da es helle Wolken auf dunklem Hintergrund besonders empfindlich detektiert. Die specMACS-CF ist aufgrund der hohen Auflösung in dieser Situation besonders niedrig (Grund wie zuvor in Kapitel 3.6).

Auch im Forschungsflug RF03 ist zu sehen, dass Unterschiede im Bedeckungsgrad besonders durch Auflösungsunterschiede hervorgerufen werden. Zudem spielt die Sensitivität von WALES und vor allem die Wolkenerkennungsmethode von SMART eine große Rolle.

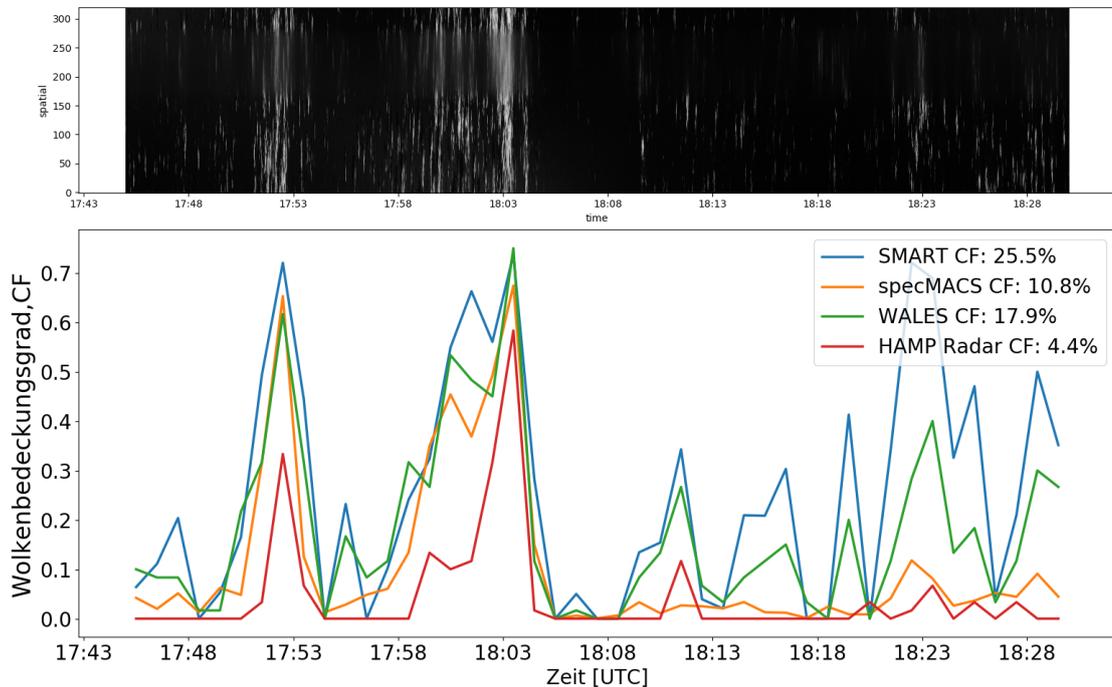


Abbildung 4.14: Oben: Bilderverlauf der specMACS SWIR DATEN 17:45 bis 18:30 UTC; unten: der zugehörige Verlauf der CF (gemittelt über 60s) für diesen Zeitraum

4.3 Der Forschungsflug RF07 am 22.08.2016

Der Forschungsflug RF07 fand am 22.08.2016 von 11:43 bis 19:37 UTC statt. In Abb. 4.15 ist der gesamte Flug dargestellt. WALES hat den höchsten Bedeckungsgrad mit 55,8%, gefolgt von SMART mit 35,8% und specMACS mit 30,6%. Das HAMP Radar zeigt den kleinsten Bedeckungsgrad mit 40,5% an. Die Reihenfolge ist wieder wie im RF06 bei höherer Bedeckung. Dieser Flug führt hauptsächlich durch Zirren. Wegen der zu hohen Reflektivität der Eiswolken, hat das Lidar zwischenzeitlich keine Messungen durchgeführt. Das HAMP Radar konnte die Eispartikel, aufgrund ihrer Größe sehr gut detektieren. SMART weicht vor allem zwischen 14:00 und 16:30 UTC von den anderen Messgeräten ab, da das Spektrometer wegen des hohen Sonnenstandes Wolken nicht von der Sonnenreflexion unterscheiden kann und die hohe Bedeckung aufgrund der Methode der Wolkendetektion (wie in Kapitel 3.2 gezeigt) nicht als geschlossen erkennen kann. Ein Abschnitt in dem alle Geräte messen konnten, ist in Abb. 4.16 dargestellt. Die Wolken sind über den gesamten specMACS SWIR-Ausschnitt verteilt und haben aber immer wieder Lücken, die der SMART Methode eine verlässliche Erkennung erlauben. Somit ergeben sich für die beiden Spektrometer specMACS und SMART fast identische Bedeckungsgrade. Das sensitive Lidar WALES misst die höchste Bedeckung mit 90,4%. Auch das HAMP

4 Ergebnisse

Radar detektiert die Zirruswolken gut und liefert somit einen relativen hohen Bedeckungsgrad von 69.3%.

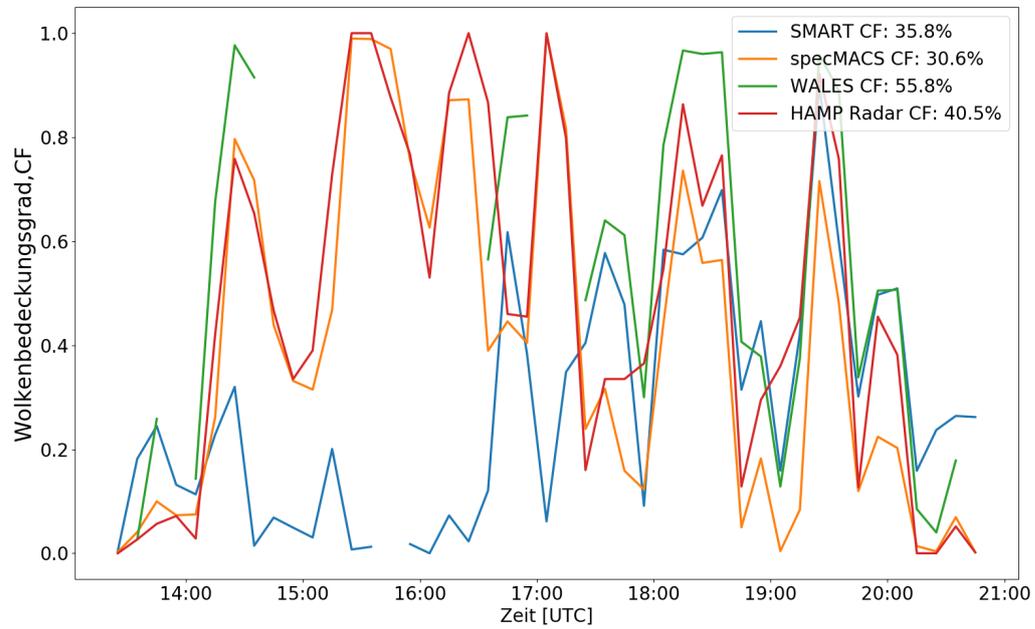


Abbildung 4.15: Verlauf der CF (gemittelt über 10 Minuten) während des gesamten Forschungsfluges RF07

4.3 Der Forschungsflug RF07 am 22.08.2016

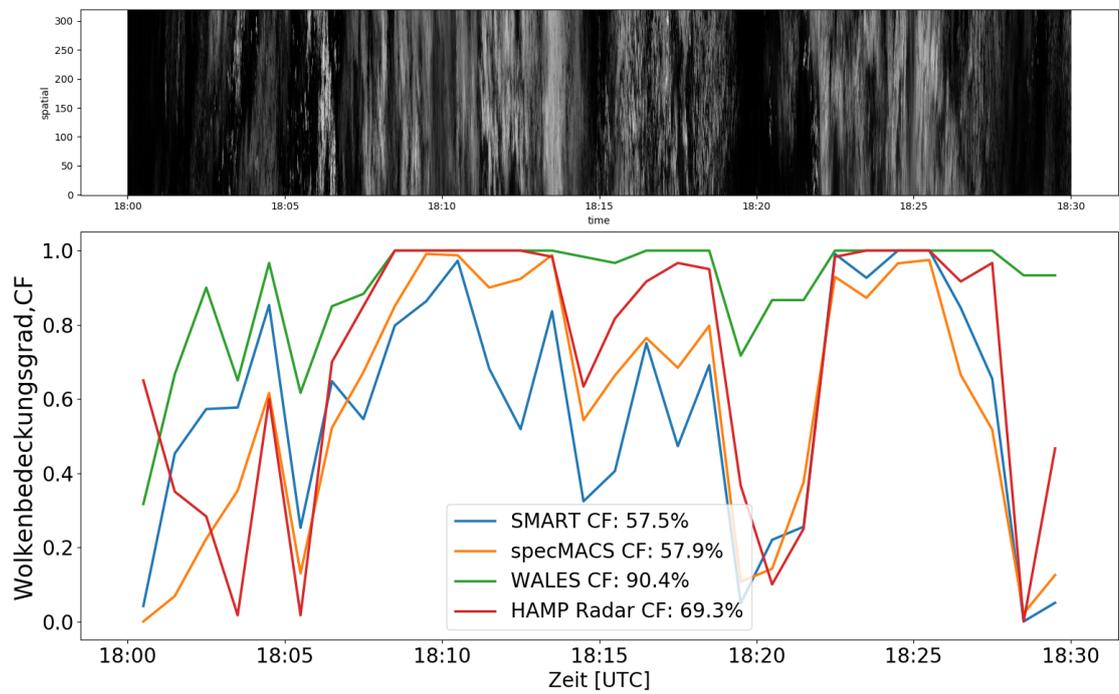


Abbildung 4.16: Oben: specMACS SWIR-Daten zwischen 18:00 und 18:30 UTC; unten: Verlauf der zugehörigen CF (gemittelt über 60s)

5 Zusammenfassung und Diskussion

Wolken sind wichtige Faktoren des Klimasystems, die jedoch noch nicht ausreichend genug verstanden sind und weiterer Untersuchungen bedürfen. Um die Kopplung von Wolken, Zirkulation und Klima über dem tropischen und subtropischen Ozean noch besser zu verstehen, startete am 8. August 2016 die NARVAL-II-Kampagne. In dieser Arbeit wurden die zwei Spektrometer specMACS und SMART, das Lidar WALES und das Radar HAMP, die während der Narval-II Kampagne über Barbados im Einsatz waren, in Bezug auf den Wolkenbedeckungsgrad miteinander verglichen. Bei ersten Vergleichen ergaben sich erhebliche Unterschiede auf deren Gründe in dieser Arbeit eingegangen werden. Im Wesentlichen ergaben sich für die Bedeckungsgrade ähnliche Reihenfolgen, in denen die Messgeräte Wolken detektieren. Allerdings variieren die einzelnen Ergebnisse recht stark, da die Geräte unterschiedlich empfindlich auf die überflogenen Wolken reagieren. Es hat sich gezeigt, dass das Lidar den höchsten Bedeckungsgrad liefert, gefolgt von den beiden Spektrometern SMART und specMACS. Das HAMP Radar detektierte am wenigsten Wolken.

Als eine Hauptursache der Unterschiede wurden die unterschiedlichen räumlich und auch zeitlichen Auflösungen der Messgeräte identifiziert. Dadurch kommt es zu relativ großen Unterschieden im Bedeckungsgrad, die im direkten Vergleich zwischen zwei Geräten minimiert werden konnten. specMACS hat ein gesamtes Sichtfeld (FOV) von $35,5^\circ$ und das Sichtfeld eines einzelnen Pixels beträgt senkrecht zur Flugrichtung $0,22^\circ$ und in Flugrichtung $0,1^\circ$. SMART besitzt ein FOV von $2,1^\circ$ und das HAMP RADAR von $0,6^\circ$. Das FOV von WALES beträgt $0,092^\circ$, die Messergebnisse wurden jedoch auf 1-Sekunde-Daten gemittelt. Das Lidar WALES reagiert am empfindlichsten auf kleinste Wolkenelemente innerhalb seines gemittelten FOV. Aufgrund der geringeren zeitlichen Auflösung im Vergleich zu specMACS kommt es zu einer Überschätzung der CF. Bei den beiden Spektrometern specMACS und SMART spielt neben der unterschiedlich hohen Auflösung einzelner Pixel vor allem der SMART-Erkennungsalgorithmus eine große Rolle. Größere Wolken können bei dieser Methode aufgrund geringer Variabilität nicht vom Hintergrund unterschieden werden und in Situationen mit Sonnenreflexion können Wolken nicht richtig identifiziert werden. Ein Vorteil der aktiven Fernerkundungsgeräten ist, dass aufgrund von Zeitdifferenzen der ausgesandten und ankommenden elektromagnetischen Strahlung, die Höhe der betrachtenden Wolke berechnet werden kann und somit Reflexe auf der Meeresoberfläche ausgeschlossen werden können. Die Sensitivität des HAMP Radars hängt stark von der Größe der Wolkenpartikel ab, daher werden kleine Tröpfchen nicht detektiert. Insgesamt kann man mithilfe dieser Arbeit sagen, dass besonders WALES und specMACS einen zuverlässigen Bedeckungsgrad liefern. Beide Messinstrumente besitzen eine hohe räumliche Auflösung. Das WALES-Lidar detektiert am sensitivsten und könnte sogar Messdaten mit höherer, zeitlicher Auflösung liefern als die, die in dieser Arbeit verwendet

5 Zusammenfassung und Diskussion

wurden. Somit könnte man Auswirkungen von sogenannten Subpixel-Effekten minimieren. specMACS liefert sogar einen Bedeckungsgrad senkrecht zur Flugrichtung (zweidimensionaler Wolkenbedeckungsgrad).

Literaturverzeichnis

- Ackerman, S. A., Strabala, K. I., Menzel, W. P., Frey, R. A., Moeller, C. C., and Gumley, L. E. (1998). Discriminating clear sky from clouds with modis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D24):32141–32157.
- Chandrasekhar, S. (1960). *Radiative Transfer*. Dover books on advanced mathematics. Dover Publications, UK.
- Cox, C. and Munk, W. (1954). Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter. *Journal of Optical Society of America*, 44(11):838–850.
- Ehrlich, A., Bierwirth, E., Wendisch, M., Gayet, J. F., Mioche, G., Lampert, A., and Heintzenberg, J. (2008). Cloud phase identification of arctic boundary-layer clouds from airborne spectral reflection measurements: test of three approaches. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(24):7493–7505.
- Ewald, F., Kölling, T., Baumgartner, A., Zinner, T., and Mayer, B. (2016). Design and characterization of specmacs, a multipurpose hyperspectral cloud and sky imager. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(5):2015–2042.
- Fu, W. Q. (2006). Radiative transfer. In Wallace, J. M. and Hobbs, P. V., editors, *Atmospheric Science (Second Edition)*, pages 113–152. Academic Press, San Diego, second edition edition.
- Gödde, F. S. (2018). Detecting clouds in the presence of sunglint: An approach using spectral water vapor absorption. Master's thesis, Ludwig-Maximilians-Universität.
- Howard, L. (1803). I. on the modifications of clouds, and on the principles of their production, suspension, and destruction; being the substance of an essay read before the askesian society in the session 1802–3. *The Philosophical Magazine*, 17(65):5–11.
- Kirchhoff, G. (1860). Ueber das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht. *Annalen der Physik*, 185(2):275–301.
- Kraus, H. (2007). *Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie*. 3.Edition, Springer-Verlag.
- Liou, K. N. (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation*. International Geophysics. Elsevier Science.

LITERATURVERZEICHNIS

- Mayer, B. (2009). Radiative transfer in the cloudy atmosphere. *European Physical Journal Web of Conferences*, 1:75–99.
- Mech, M., Orlandi, E., Crewell, S., Ament, F., Hirsch, L., Hagen, M., Peters, G., and Stevens, B. (2014). HAMP – the microwave package on the High Altitude and Long range research aircraft (HALO). *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(12):4539–4553.
- Mie, G. (1908). Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik*, 330(3):377–445.
- Planck, M. (1901). Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen der Physik*, 309(3):553–563.
- Skolnik, M. I. (1980). *Introduction to Radar Systems*. Electrical Engineering Series. McGraw-Hill.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Alexander, L. V., Allen, S. K., Bindoff, N. L., Breon, F. M., Church, J. A., Cubasch, U., Emori, S., Forster, P., Friedlingstein, P., Gillett, N., Gregory, J. M., Hartmann, D. L., Jansen, E., Kirtman, B., Knutti, R., Krishna Kumar, K., Lemke, P., Marotzke, J., Masson-Delmotte, V., Meehl, G. A., Mokhov, I. I., Piao, S., Ramaswamy, V., Randall, D., Rhein, M., Rojas, M., Sabine, C., Shindell, D., Talley, L. D., Vaughan, D. G., and Xie, S. P. (2013). *Technical Summary: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, chapter TS, pages 33–115. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Thomas, G. E. and Stamnes, K. (1999). *Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean*. Cambridge Atmospheric and Space Science Series. Cambridge University Press.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., and Kiehl, J. (2009). Earth’s global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3):311–324.
- Wallace, J. M. and Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric science - cloud microphysics. In Wallace, J. M. and Hobbs, P. V., editors, *Atmospheric Science (Second Edition)*, pages 209–269. Academic Press, San Diego, second edition edition.
- Wendisch, M., Müller, D., Schell, D., and Heintzenberg, J. (2001). An airborne spectral albedometer with active horizontal stabilization. 18:1856–1866.
- Werner, C. and Streicher, J. (2005). *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Series in optical sciences. Springer.
- Wirth, M., Fix, A., Mahnke, P., Schwarzer, H., Schrandt, F., and Ehret, G. (2009). The airborne multi-wavelength water vapor differential absorption lidar wales: system design and performance. *Applied Physics B*, 96:201–213.
- Zinth, W. and Zinth, U. (2013). *Optik: Lichtstrahlen - Wellen - Photonen*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Energiebudget der Erde	1
2.1	Elektromagnetisches Spektrum	5
2.2	Plancksche Emissionskurven	8
2.3	Normierte effektive Rückstreufläche	10
3.1	specMACS VNIR und SWIR Sensoren	13
3.2	Messung der Wasserdampfabsorption	14
3.3	SWIR-Ausschnitt mit specMACS Wolkenmaske	15
3.4	Blickfelder der Messgeräte	19
3.5	Zeitdifferenz der Wolkendetektion	19
3.6	Sensitivitäts- und Auflösungsunterschiede	20
4.1	Gesamtbedeckungsgrad RF06	22
4.2	Bedeckungsgrad RF06 15:00 bis 16:00 UTC	23
4.3	Bedeckungsgrad RF06 18:10 bis 18:30 UTC	23
4.4	SMART-Pixel von 16:01 bis 16:02 UTC	25
4.5	Verlauf Bedeckungsgrad specMACS und SMART von 16:01 bis 16:02 UTC	26
4.6	Verlauf Bedeckungsgrad specMACS und SMART von 18:12 bis 18:13 UTC	26
4.7	specMACS SWIR-Daten innerhalb einzelner SMART Pixel von 18:12 bis 18:13 UTC	27
4.8	specMACS SWIR-Daten innerhalb einzelner WALES Footprints von 15:24-15:25 UTC	29
4.9	Verlauf Bedeckungsgrad specMACS und WALES von 15:24-15:25 UTC	29
4.10	WALES FOV von 18:24-18:25 UTC	30
4.11	Modifizierter specMACS-WALES Vergleich	30
4.12	Gesamtbedeckungsgrad RF03	31
4.13	Verlauf Bedeckungsgrad RF03 zwischen 15:30 und 16:15 UTC	32
4.14	Verlauf Bedeckungsgrad RF03 von 17:30 bis 18:39	33
4.15	Gesamtbedeckungsgrad RF07	34
4.16	Verlauf Bedeckungsgrad RF07 von 18:00 bis 18:30	35

Tabellenverzeichnis

2.1	Wolkenklassifikation nach Howard (1803)	4
2.2	Überblick der wichtigsten Strahlungsgrößen in Anlehnung an Mayer (2009)	7

Danksagung

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

Zuerst einmal möchte ich bei Herrn Dr. Tobias Zinner für die Unterstützung, die Geduld und die Ideen zur Verbesserung meiner Arbeit bedanken. Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr. Bernhard Mayer für die interessante Themenstellung und die Vermittlung dieser Bachelorarbeit danken. Mein Dank geht auch an Tobias Kölling, der mir mit sehr viel Geduld geholfen hat, Computerprobleme zu lösen. Ebenfalls möchte ich mich bei Lucas Höppler und Felix Gödde bedanken, die mir mit sehr viel Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite standen. Außerdem danke ich allen NARVAL-II Beteiligten für die Bereitstellung der Daten und Beantwortung meiner Fragen.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht und mich immer wieder angespornt haben.

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich meine Bachelorarbeit mit dem Titel
Der Wolkenbedeckungsgrad während der Messkampagne NARVAL-2
selbstständig verfasst, sowie keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel
benutzt habe.

München, den 13. März 2018

(Sabrina Jessica Pavicic)