

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:

Institut für Weltraumwissenschaften, Freie Universität Berlin

Förderkennzeichen:

50 EE 1221

Vorhabenbezeichnung:

**WadaMo - Fernerkundung des Wasserdampfsäulengehaltes
mit Hilfe inverser Modellierung**

Laufzeit des Vorhabens:

01.06.2012 – 31.05.2015, verlängert bis 30.09.2015

Berichtszeitraum:

01.06.2012 – 30.09.2015

Autoren:

**Hannes Diedrich
René Preusker**

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung wesentlicher Projektdaten	3
1.1	Einleitung	3
1.2	Aufgabenstellung	3
1.3	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4.1	Projektmanagement	4
1.4.2	Strahlungstransportsimulationen	4
1.4.3	Verfahrensentwicklung	4
1.4.4	Testdatengenerierung	5
1.4.5	Algorithmusvalidierung und spektrale Feinjustierung	5
1.5	Wissenschaftliche und technische Standards	5
1.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2	Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse	7
2.1	Erzielte Ergebnisse	7
2.1.1	WadaMo Wasserdampfableitungsverfahren	7
2.1.2	Testdatensätze	8
2.1.3	Algorithmusvalidierung, Spektrale Feinjustierung	8
2.1.4	Anwendung des Verfahrens	11
2.2	Nutzen der Ergebnisse und Verwertungsplan	12
2.3	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens	14
2.4	Veröffentlichungen	14
	Literaturverzeichnis	14

Kapitel 1

Kurzdarstellung wesentlicher Projektdaten

1.1 Einleitung

Wasserdampf spielt eine wichtige Rolle in der Erdatmosphäre. Es ist ein bedeutender Bestandteil des Wasserkreislaufs und ist verantwortlich für den größten Teil am Treibhauseffekt. Mehrere Rückkopplungsmechanismen sind mit dem Wasserdampf verbunden, welche durch die Erhöhung der mittleren globalen Temperatur als Teil der Klimaveränderung hervorgerufen werden. Die Beobachtung von Wasserdampf ist essentiell für die Überwachung des Klimas der Erde. Die Vielfalt an Observationen vom Boden und aus dem Weltraum hat über die Jahre zugenommen. Allerdings können nur weltraumgestützte Sensoren die globale Abdeckung zur Verfügung stellen. Im Moment können nur Spektrometer, die reflektiertes Sonnenlicht messen, räumliche Auflösungen von bis zu wenigen hundert Metern erreichen.

1.2 Aufgabenstellung

Innerhalb des Projektes wurde ein Verfahren zum Ableiten des Wasserdampfsäulengehaltes (TCWV) entwickelt, implementiert und verifiziert welches TCWV aus Radianzmessungen in der $\rho\sigma\tau$ -Wasserdampfabsorptionsbande um 950 nm über wolkenfreien Landoberflächen bestimmt. Das Verfahren kann auf Satellitensensoren adaptiert werden, die im nahen infraroten Spektralbereich messen, wie z.B. *Ocean and Land Color Instrument* (OLCI) auf Sentinel-3, EnMap, Sentinel-2, METimage und *Meteosat Third Generation* (MTG).

Um die Leistungsfähigkeit des Algorithmus abzuschätzen, wurden prozessierte TCWV Daten mit mehreren unabhängigen bodengestützten Beobachtungen verglichen, wie z.B. von *Global Navigation Satellite System* (GNSS) Stationen und *GCOS Reference Upper Air Network* (GRUAN) Radiosonden.

Der Algorithmus wurde in die Softwaretoolbox BEAM integriert und steht so einer breiten Anwendergemeinde zur Verfügung.

1.3 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Institut für Weltraumwissenschaften der Freien Universität Berlin arbeitet seit über 20 Jahren auf dem Gebiet der erdbezogenen Fernerkundung. Das Institut ist international anerkannt in der Modellierung des Strahlungstransports im System Ozean-Atmosphäre sowie der Entwicklung von Fernerkundungsverfahren für Satellitendaten. Maßgeblich hat das Institut zur Entwicklung und Validierung von Algorithmen für ENVISAT-MERIS beigetragen. Am Institut für Weltraumwissenschaften wurde das Strahlungstransportmodell MOMO entwickelt (Fischer and Grassl 1984) und kontinuierlich genutzt und erweitert (Doppler *et al.* 2014a, Fell and Fischer 2001, Hollstein and Fischer 2012). Es stellte die Grundlage für die Entwicklung diverser, operationeller MERIS Algorithmen am Institut für Weltraumwissenschaften dar, wie beispielsweise dem Verfahren zur Ableitung der Wolkenhöhe oder der Bestimmung des Säulenwasserdampfgehaltes, wie beispielsweise dem Verfahren zur Ableitung der Wolkenhöhe oder der Bestimmung des Säulenwasserdampfgehaltes.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung und Umsetzung des Vorhabens erfolgte anhand der im Projektantrag definierten Arbeitspakete und Meilensteine. Das Vorgehen in den einzelnen Arbeitspaketen wird in diesem Kapitel knapp dargestellt, die erzielten Ergebnisse sind dann in Kapitel 2 ausführlich erläutert.

1.4.1 Projektmanagement

Dieses Arbeitspaket enthält die Erstellung von Zwischenberichten sowie dieses Abschlussberichts.

1.4.2 Strahlungstransportsimulationen

In diesem Arbeitspaket wurden umfangreiche Strahlungstransportsimulationen mit dem Matrix Operator Modell MOMO (Doppler *et al.* 2014a, Fell and Fischer 2001, Fischer and Grassl 1984, Hollstein and Fischer 2012), für die Generierung von Tabellen (LUTs) zur Streukorrektur unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Beobachtungsgeometrien der verschiedenen Instrumente und verschiedener Aerosoltypen und Aerosol-optischer Dicken, durchgeführt. Die Berechnung der Absorptionseigenschaften der Atmosphäre erfolgt aufgrund der Architektur des Verfahrens separat und wurde mit Hilfe der Datenbank von Rothman *et al.* (2010) mit den Verfahren von Clough *et al.* (2005) und (Bennartz and Fischer 2000, Doppler *et al.* 2014b) verwirklicht. Die Absorptionseigenschaften wurden als Funktion des Wasserdampfsäulengehaltes, der Beobachtungsgeometrie, Bodendruck und -Temperatur unter Berücksichtigung der spektralen Eigenschaften der Instrumente tabelliert. Die rechenaufwändigen Simulationen der Streukorrekturen wurden für den Wellenlängenbereich zwischen 870 nm und 1200 nm in 1 nm-Schritten durchgeführt tabelliert. Dieses Vorgehen erlaubt die Anpassung des Vorwärtsoperators an die verschiedenen Instrumente durch Austausch der jeweiligen Tabellen und gewährleistet darüber hinaus eine maximale Flexibilität im Hinblick auf die angenommenen optischen Eigenschaften der Streuer in der Atmosphäre.

1.4.3 Verfahrensentwicklung

Das Verfahren basiert auf dem Prinzip der *Optimal Estimation* (Rodgers 2000), einer iterativen Methode zur optimalen Bestimmung der Messgröße. Die Realisierung des Verfahrens als inverse Modellierung ermöglicht es, jedem abgeleiteten Wasserdampfwert eine Unsicherheit zuzuordnen, was von zentraler Wichtigkeit für die Nutzung der Daten wie die Assimilation in die Modellierung oder die Berechnung und Analyse von Zeitserien ist. Ein besonderes Augenmerk liegt deshalb auf einer gründlichen Fehlercharakterisierung der Eingabeparameter und der Fehlerfortpflanzung, um die Abschätzung möglichst realistischer Ableitungsfehler zu gewährleisten.

Dieses Arbeitspaket beinhaltet die Erstellung der *Breadboard* Software des Algorithmus und von Test-Suites. Bedauerlicherweise brach im April 2012 der Kontakt zu ENVISAT ab. Zu diesem Zeitpunkt war Sentinel-3 noch nicht gestartet (der Start erfolgte erst am 16.02.2016). Infolgedessen wurde das Verfahren auf die Kanalsetzung des *MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) auf Aqua und Terra angewendet, um die Lücke zwischen den Wasserdampfzeitserien von MERIS und OLCI zu schließen.

Die theoretischen Grundlagen und die praktische Umsetzung des im Rahmen des Projektes entwickelten Verfahrens wurden in einem ATBD (Algorithm Theoretical Basis Document) detailliert dokumentiert.

1.4.4 Testdatengenerierung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes werden Testdaten erzeugt, die dazu dienen die Funktionalität des WadaMo-Prozessors zu demonstrieren. Hierzu wurden verschiedene bodengestützte Beobachtungen von Wasserdampf verwendet, von z.B. Mikrowellenradiometer (MWR), *Global Navigation Satellite System* (GNSS) Stationen und *GCOS Reference Upper Air Network* (GRUAN) Radiosonden und AERONET Sonnephotometer.

1.4.5 Algorithmusvalidierung und spektrale Feinjustierung

In diesem Arbeitspaket wurde der Vergleich von Wasserdampfsäulengehalten berechnet aus MERIS und MODIS Messungen zu den bodengestützten Wasserdampfdaten durchgeführt, die im letzten Arbeitspaket generiert wurden. Es wurde versucht, kleine Abweichungen durch eine spektrale Feinjustierung des Absorptionsvorwärtsoperators zu eliminieren.

1.5 Wissenschaftliche und technische Standards

Die genaueste Methode zur Bestimmung des Wasserdampfsäulengehalts über Land nutzt die Absorption reflektierten Sonnenlichts durch Wasserdampf bei 900 nm. Die Satellitenspektrometer MERIS und MODIS haben entsprechende Kanäle. Alle bisherigen operationellen Verfahren basieren auf linearen oder nichtlinearen Regressionsmethoden, die den entscheidenden Nachteil haben, dass sie keine inhärente Fehlerabschätzung ermöglichen (z.B. Gao and Kaufman (2003)). Ohne diese ist aber eine weitere Nutzung in der Klimamodellierung und -validierung, sowie in der Assimilation in groß- und kleinskalige Modelle nicht möglich. Im thermischen Infrarot werden seit langem variationelle Verfahren (*optimal estimation*) verwendet, die eine pixelbasierte Abschätzung der Unsicherheit ermöglichen. Für Messungen im sichtbaren und nahen

Infrarot wurden derartige Ansätze bisher nicht operationell realisiert, da die dafür notwendigen Strahlungstransportsimulationen, die die Wechselwirkung von Streuung und Absorption berücksichtigen müssen, zu aufwendig waren. Im Rahmen des Glob-Vapour Projekts der ESA wurde zum ersten Mal ein operationelles Verfahren für die Bestimmung des Wasserdampfsäulengehaltes aus MERIS Messungen entwickelt, das auf der optimal estimation theory basiert Lindstrot *et al.* (2012). Erst dadurch wurde es möglich, aus MERIS Daten Zeitreihen zu erstellen, die klimatologische Anforderungen erfüllen.

1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Implementierung des BEAM Prozessors wurde an die Firma Brockmann Consult GmbH ist aufgrund ihres fachlichen Know-how für wissenschaftliche Algorithmen im Allgemeinen und Wasserdampf-Retrieval im Besonderen, sowie ihrer speziellen vertieften Kenntnis der BEAM open source Toolbox, vergeben.

Kapitel 2

Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 WadaMo Wasserdampfableitungsverfahren

Es wurde ein Verfahren zur Ableitung des Wasserdampfsäulengehaltes (TCWV) über wolkenfreien Landoberflächen entwickelt, welches weltraumgestützte Radianzmessungen im nahen Infrarot verwendet. Der Algorithmus kann auf alle Spektrometer, die in der $\rho\sigma\tau$ -Wasserdampfabsorptionsbande messen, mit wenig Aufwand adaptiert werden. Der Prozessor minimiert iterativ die Differenz zwischen simulierten und gemessenen Strahldichten im Wasserdampfabsorptionskanal auf dem Prinzip der *Optimal Estimation* (Rodgers 2000). Das Verfahren stellt eine Abschätzung der Unsicherheiten auf Pixelbasis bereit, welche alle Fehler berücksichtigt, die durch Annahmen im Vorwärtsoperator entstehen. Dieses universelle Wasserdampfableitungsverfahren wurde wie geplant auf die Kanalsetzung von MERIS angewendet und steht bereit auf OLCI Beobachtungen übertragen zu werden. Um die Lücke in der Säulenwasserdampf Zeitserie zu schließen, wurde der Algorithmus zusätzlich auf die Kanalsetzung von MODIS angewendet. Das WadaMo Wasserdampfableitungsverfahren wurde planmäßig in die Softwaretoolbox BEAM implementiert.

MERIS Verfahren Im MERIS Verfahren wird die Radianz am Oberrand der Atmosphäre in einem Wasserdampfabsorptionskanal bei 900 ± 5 nm (Kanal 15) durch den Vorwärtsoperator simuliert. Dazu werden die zwei Fensterkanäle (Kanal 13: 865 ± 10 nm, Kanal 14: 885 ± 5 nm) mit nur wenig Wasserdampfabsorptionsmerkmalen für die Abschätzung der Oberflächenalbedo verwendet.

MODIS Verfahren Der Vorwärtsoperator im MODIS Verfahren simuliert Radianzen in drei Wasserdampfabsorptionskanälen (Kanal 17: 905 ± 15 nm, Kanal 18: 936 ± 5 nm, Kanal 19: 940 ± 20 nm). Für die Abschätzung der Bodenalbedo werden die beiden nächsten Fensterkanäle verwendet (Kanal 5: 1240 ± 10 nm, Kanal 2: 865 ± 20 nm). In dem *optimal estimation* Verfahren, werden die Messungen implizit nach Informationsgehalt bezüglich des TCWV des jeweiligen Absorptionskanals gewichtet.

2.1.2 Testdatensätze

Vier verschiedene Datensätze von bodengestützten Beobachtungen des Säulenwasserdampfgehalts wurden verwendet (räumliche Verteilung siehe Abbildung 2.1; Zahlen in Klammern geben den verwendeten Zeitraum an):

1. Global verteilte *Global Navigation Satellite System* (GNSS) Stationen (2003-2011)
2. ARM Mikrowellen Radiometer (MWR) von drei Stationen (North Slope of Alaska, Southern Great Plains, Tropical West Pacific) (2002-2012)
3. *GCOS Reference Upper Air Network* (GRUAN) Radiosonden (2007-2014)
4. Global verteilte AERONET Sonnenphotometer (2003-2014)

Die Daten wurden zeitlich und örtlich für jeden MODIS und MERIS Überflug kolloziert. Es wurden nur Szenen verwendet, die zu 90 % wolkenfrei waren. Die geringsten Ungenauigkeiten sind vom MWR Datensatz zu erwarten. Deshalb wurde dieser Datensatz zur spektralen Feinjustierung verwendet.

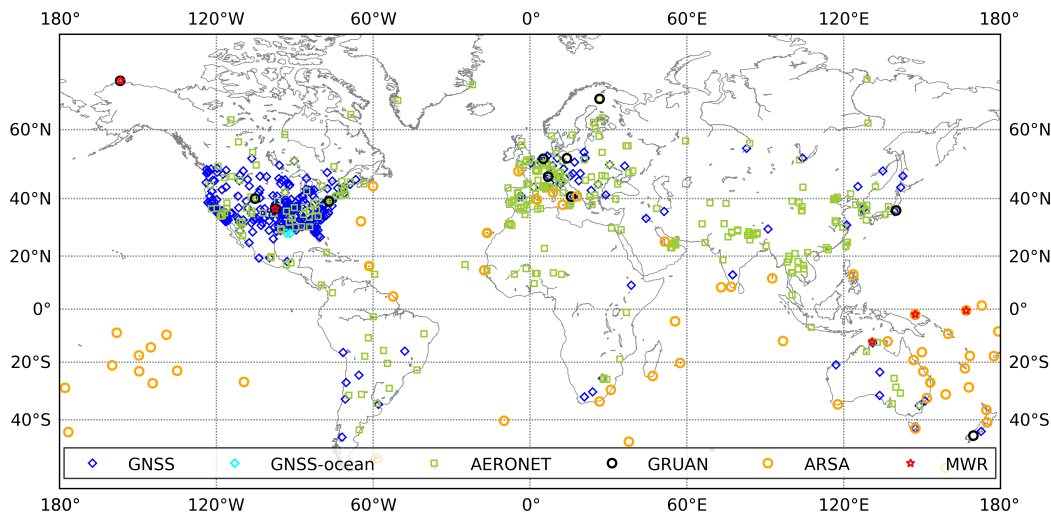


Abbildung 2.1: Verteilung der Stationen der Validierungsdatensätze.

2.1.3 Algorithmusvalidierung, Spektrale Feinjustierung

Spektrale Feinjustierung

Der Vergleich zwischen Wasserdampfsäulengehalten vom WadaMo-Verfahren aus MODIS und MERIS Messungen zum MWR Datensatz ergab kleine Abweichungen (Abbildung 2.2). Der Algorithmus leitet für MODIS 5 % zu niedrige TCWV Werte und für MERIS 5 % zu feuchte Werte ab.

Um zu analysieren, woher die Abweichungen im MODIS Fall stammen, wurde das WadaMo Verfahren unter Verwendung nur jeweils eines Absorptionskanals angewendet. Der Vergleich zum MWR Datensatz ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Es ergeben sich unterschiedliche Abweichungen für jeden Kanal, wobei das Verfahren welches Kanal 17 verwendet die größten Deviationen aufweist.

Ein systematischer Fehler des MWR Datensatz kann ausgeschlossen werden, da nicht in jedem Kanal die gleiche Abweichung festgestellt wurde. Eine hypothetisch

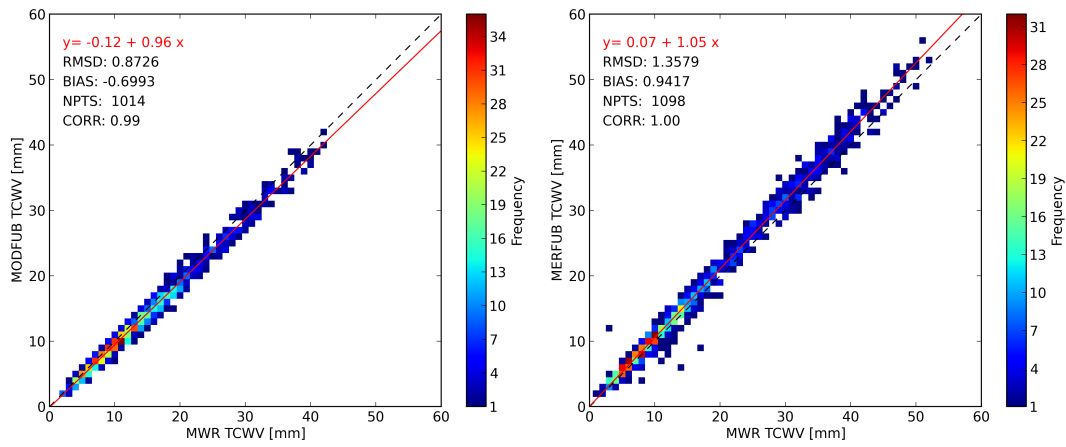


Abbildung 2.2: Streudiagramm für den Vergleich zwischen Säulenwasserdampfgehalten TCWV von bodengestützten MWR und dem WadaMo-Verfahren für MODIS (links) und MERIS (rechts).

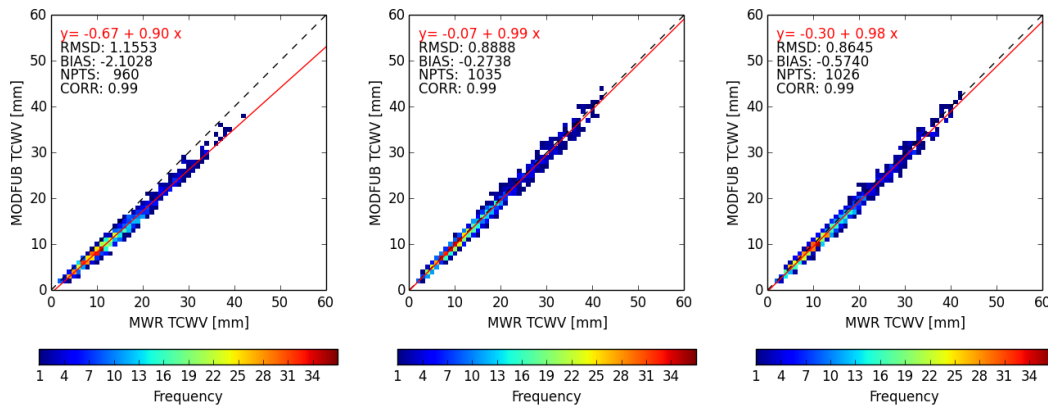


Abbildung 2.3: Streudiagramm für den Vergleich zwischen Säulenwasserdampfgehalten TCWV von bodengestützten MWR und dem WadaMo-Verfahren für MODIS bei dem jeweils nur ein Absorptionskanal verwendet wurde (links: Kanal 17, Mitte: Kanal 18, rechts: Kanal 19).

falsche Charakterisierung der Zentralwellenlänge der Kanäle konnte als alleiniger Grund für die Abweichungen ausgeschlossen werden: Abbildung 2.4 zeigt den Bias und *root mean square deviation* (RMSD) zwischen simulierten und gemessenen atmosphärischen Transmissionen. Im Detail wurde der MWR TCWV als Input für den WadaMo Vorwärtsoperator verwendet und für die MODIS- Beobachtungsgeometrie Transmissionswerte berechnet die mit den gemessenen Transmissionen verglichen wurden (gemessene Strahldichte / Strahldichte ohne Wasserdampfabsorption ; Details siehe ATDB). Zusätzlich wurden die Zentralwellenlängen der Kanäle für jeden der 10 MODIS Detektoren variiert. Aus Abbildung 2.4 ergeben sich zum Teil sehr hohe notwendige Verschiebungen der Zentralwellenlänge um den Bias und den RMSE zu minimieren. Diese Verschiebungen von über 2 nm sind durch die ständigen Kalibrierungsmaßnahmen von MODIS nicht nachgewiesen.

Ferner ist der Einfluss der Verschiebung der Zentralwellenlänge für das MERIS Verfahren nicht ersichtlich (siehe Abbildung 2.5). Dort beeinflusst die baulich bedingte Verschiebung der Zentralwellenlänge die Transmission im Kanal 15 nicht.

Weitere Untersuchungen zur Erklärung der Abweichungen des Verfahrens zum

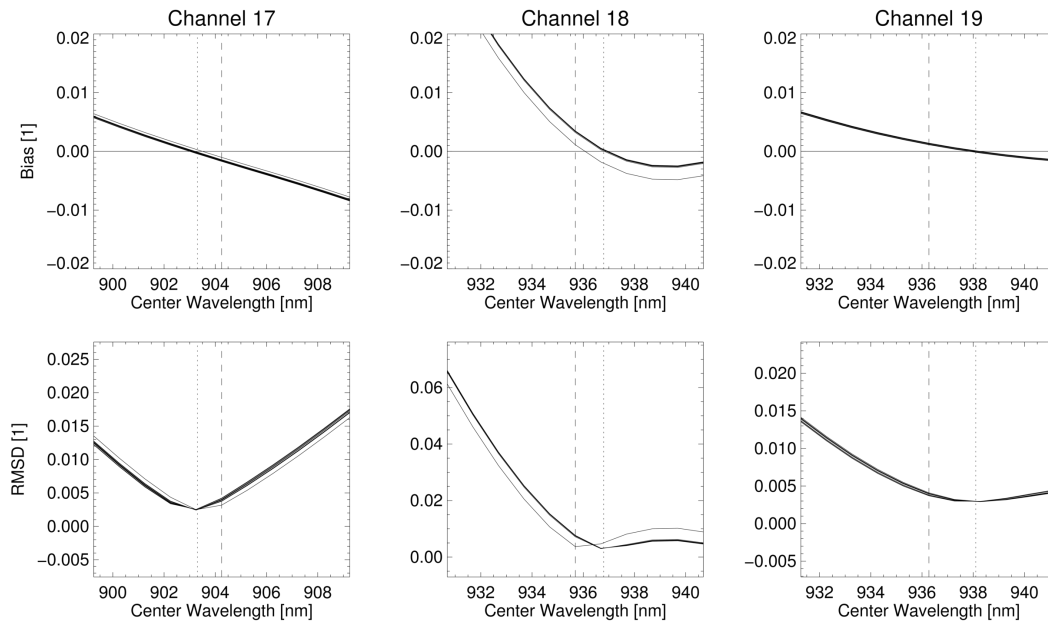


Abbildung 2.4: Bias und RMSD zwischen gemessenen und simulierten TOA Reflektanzen als Funktion der simulierten Zentralwellenlänge für jeden der 10 Detektoren in MODIS Kanal 17, 18 und 19; gestrichelte Linie: Position ursprünglichen Zentralwellenlänge; fein gestrichelte Linie: Notwendige Verschiebung der Zentralwellenlänge damit Bias gleich 0 und RMSD minimal.

Vergleichsdatensatz ergaben, dass der Aerosoltyp, -optische Dicke und -Höhe zwar signifikante Wirkung auf die simulierten Transmissionen haben jedoch nicht komplett die Abweichungen erklären können. Die Ursache kann noch an Fehlern bei der Berechnung der Absorptionskoeffizienten liegen

Um die Deviation der simulierten Wasserdampfmengen von der 'Wirklichkeit' zu eliminieren wurden Koeffizienten ermittelt, die die Transmission des Absorptionsoperators so korrigieren, dass die Abweichungen zwischen abgeleiteten und MWR TCWV Werten minimal wird.

Validierung des MERIS Verfahren

Der Vergleich des korrigierten MERIS WadaMo-Verfahrens gegenüber den bodengestützten Beobachtungen ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Es wurden nun nur noch kleine Abweichungen festgestellt (Bias gegenüber MWR: 0.06 mm, Bias gegenüber GNSS: 0.59 mm). Die Streuung ist im Vergleich mit GNSS Beobachtungen höher, was zum Einen an der größeren Anzahl an Vergleichsfällen und zum Anderen an Ungenauigkeiten des GNSS Datensatzes liegt.

Validierung des MODIS Verfahren

Der Vergleich des korrigierten MERIS WadaMo-Verfahrens gegenüber den bodengestützten Beobachtungen ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Für alle Datensätze ergeben sich hohe Korrelationen (0.96-0.99), geringe systematische Abweichungen (-0.02 mm bis 1.3 mm) und Streuungen zwischen 0.9 mm und 2 mm. Im Vergleich mit AERONET kann der signifikante Bias durch eine Unterschätzung des TCWV der Sonnenphotometer erklärt werden (Pérez-Ramírez *et al.* 2014). Wieder sind die Streuungen im Vergleich zu GNSS erhöht. Um auszuschließen, dass keine Abhängigkeit des Bias zum Ort der

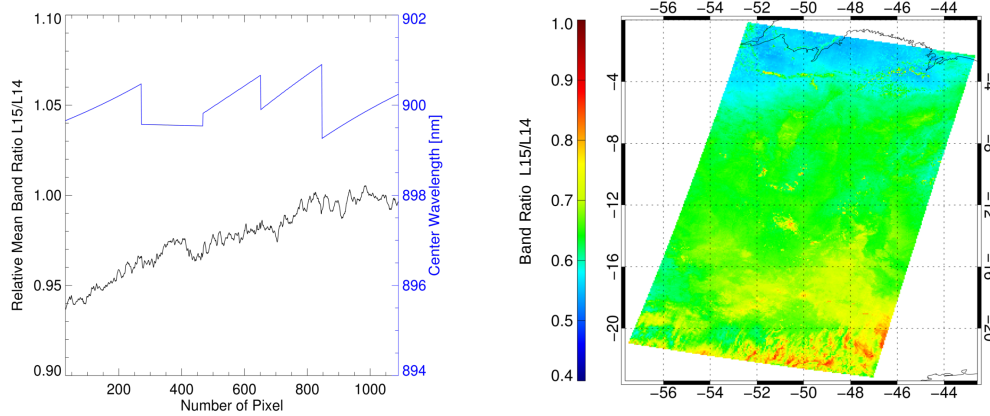


Abbildung 2.5: Beispiel für die Unabhängigkeit der Verschiebung der Zentralwellenlänge und auf das Verhältnis Strahlendichten im Kanal 15 und 14 (L15/L14). Linke Spalte: Relatives Mittel des Verhältnisses über allen Pixel entlang des Satellitenpfads von einer wolkenfreien Szene über dem Amazonas Gebiet (siehe rechte Spalte) als Funktion des Pixelnummer (schwarz). Zusätzlich ist die Zentralwellenlänge des Absorptionskanals 15 in Abhängigkeit der Pixelnummer gezeigt (blau).

GNSS Stationen besteht, wurde in Abbildung 2.8 die globale Verteilung der Abweichungen zwischen MODIS und GNSS dargestellt. Es zeigt sich, dass die meisten Stationen negative Abweichungen aufweisen, die sich jedoch nur im Bereich von 1 mm bewegen. Dies ist konsistent mit dem Bias, der in Abbildung 2.7 gefunden wurde. Die Verteilung der Abweichungen zeigt jedoch keine Abhängigkeit zur geographischen Breite oder der Höhe der Stationen auf.

Untersuchung der Zeitabhängigkeit

Abbildung 2.9 den jährlich gemittelten Bias als Funktion der Zeit (Jahre) für das MERIS und MODIS Verfahren (für Aqua und Terra getrennt betrachtet) dargestellt. Die obere Grafik zeigt den Vergleich zu MWR Daten und die untere Grafik den Vergleich zu GNSS Daten.

Es ergibt sich, dass es keine zeitliche Abhängigkeit der Abweichungen gibt. Die Streuung der Abweichungen ist für den GNSS Datensatz erhöht, was, wie im letzten Abschnitt erwähnt, vom Testdatensatz herrührt.

2.1.4 Anwendung des Verfahrens

Es wurde einer Fallstudie über kleinräumige Wasserdampfstrukturen angefertigt und veröffentlicht (Carbajal Henken *et al.* 2015). Abbildung 2.10 zeigt das MERIS Wasserdampffeld in *Full Resolution* (260 m x 290 m) über Mitteleuropa für den 09.05.2008 welches mit dem WadaMo Prozessor abgeleitet wurde. Zusätzlich ist die Windrichtung (mittlerer Wind in der Grenzschicht aus ERA interim) mit Pfeilen dargestellt. Die Länge der Pfeile ist ein Maß für die Windstärke. Weiße Pixel stellen Wolken dar. Vordergründig ist ein ausgedehntes Gebiet geringeren Säulenwasserdampfes welches sich von der Kieler Förde bis zum Erzgebirge senkrecht zur Windströmung erstreckt.

Die detaillierte Betrachtung der Strukturen über Ostdeutschland und Polen lässt

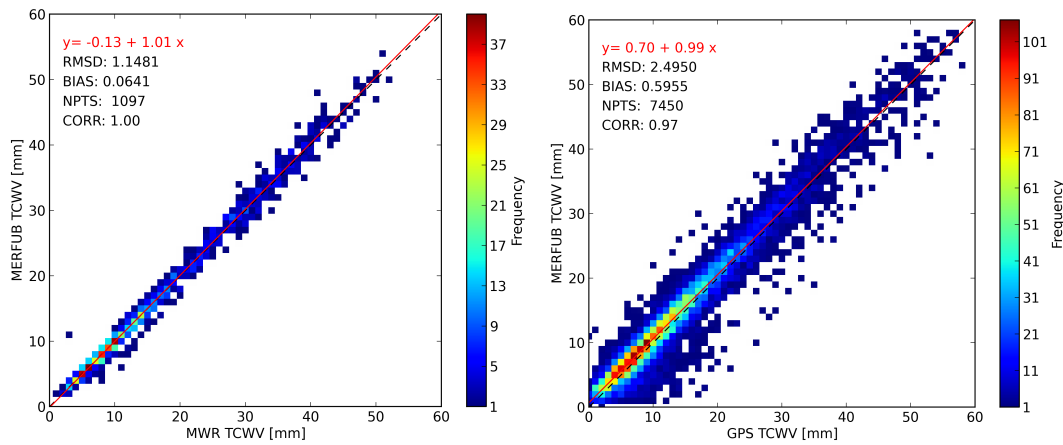


Abbildung 2.6: Streudiagramm für den Vergleich zwischen TCWV Werten abgeleitet mit dem WadaMo Verfahren und den bodengestützten Datensätzen (links: MWR, rechts: GNSS).

kleinräumige und regelmäßige Strukturen erkennen (siehe Abbildung 2.11). Es zeigen sich Streifen, die entlang der Windrichtung angeordnet sind. Zusätzlich sind entlang dieser Streifen Blasen erhöhten Wasserdampfes wie auf einer Perlenkette angeordnet. Diese Strukturen wurden damit begründet, dass sich unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen Zirkulationsmuster bilden, die an Rollen erinnern, betrachtet man sie quer zur Windrichtung. Durch diese Konvektionsmuster wird Wasserdampf in Streifen- und Blasenform akkumuliert und spiegelt sich dann auch in der Säule wieder. Die Vorteile einer Sondierung mit hoher räumlicher Auflösung werden bei dieser Fallstudie sichtbar, da die einzelnen Konvektionsblasen in der geringen räumlichen Auflösung nicht sichtbar sind (siehe Abbildung 2.11). In der Publikation werden die Wetterverhältnisse und im Besonderen die atmosphärische Schichtung untersucht und diskutiert. Reanalyse-Daten sowie Radiosondenaufstiege werden dafür herangezogen. Die Größe der Zellen und der Abstand der Streifen hängen von den Eigenschaften der Luftmasse ab.

2.2 Nutzen der Ergebnisse und Verwertungsplan

Dieses Projekt zielte in erster Linie auf die wissenschaftliche Verfahrens-Weiterentwicklung ab. Durch die Bereitstellung des Prozessors als open source software ist die Möglichkeit für kommerzielle Dienstleister im Bereich Wettervorhersage und Klima gegeben, das Verfahren in operationelle Verarbeitungsketten einzubinden und Produkte und Dienstleistungen anzubieten (z.B. meteorologische Dienste wie weathernews.com oder meteomedia).

Eine Beschreibung des Verfahrens inklusive der Ergebnisse der Validierung für den MODIS Algorithmus wurde in Fachliteratur veröffentlicht (Diedrich *et al.* 2015). Außerdem wurde eine ATBD für das implementierte Verfahren erstellt. Für alle zukünftigen Sensoren (speziell OLCI) wurden breadboards vorbereitet, die zwar vorläufigen Charakter haben, aber für Fallstudien und Sensitivitätsuntersuchungen nutzbar sein werden. Die Ergebnisse der spektralen Feinjustierung werden in Form eines Fachartikels veröffentlicht.

Das OLCI Verfahren kann als Benchmark für das Standard L2- Wasserdampf Verfahren der ESA dienen. Wenn das OLCI Verfahren erfolgreich validiert wurde, kann

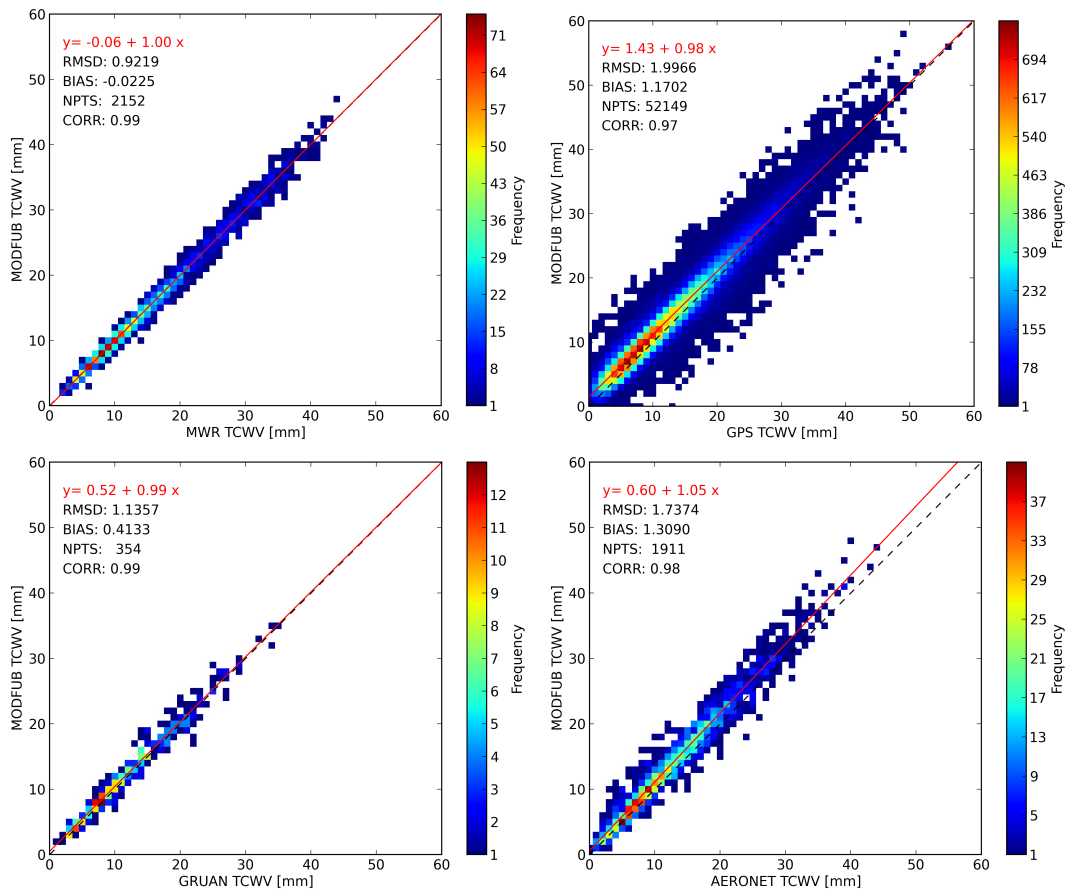


Abbildung 2.7: Streudiagramm für den Vergleich zwischen TCWV Werten abgeleitet mit dem WadaMo Verfahren und den bodengestützten Datensätzen (oben links: MWR, oben rechts: GNSS, unten links: GRUAN Radionsonden, unten rechts: AERONET).

der OLCI Wasserdampf Teil des CM-SAFs des Deutschen Wetterdienstes werden. Die Einbeziehung der MERIS-Daten und der MODIS-Daten als Interims-Lösung ist geplant. Die Wasserdampfbestimmung für Sentinel-2 und EnMap hat das Potential die operationellen Atmosphärenkorrekturverfahren zu verbessern, da die Streueigenschaften (hydrophiler) Aerosolpartikel direkt von der relativen Feuchte abhängen.

Durch die Implementierung in ein Plug-In für die Open Source Toolbox BEAM wird das hier entwickelte Verfahren einer breiten Wissenschaftler Gemeinde zur Verfügung stehen. Erfahrungsgemäß ist diese Bereitstellung von tool, source code und wissenschaftlicher Dokumentation die beste Methode, um eine breite wissenschaftliche Nutzung des Verfahrens zu erreichen, wissenschaftlichen Diskurs zu stimulieren und eine Weiterentwicklung im internationalen Kontext voranzutreiben.

Seitens der FU Berlin ist konkret geplant, auf der Grundlage von WadaMo mit Hilfe von räumlich hochaufgelösten Wasserdampffeldern (von EnMap und Sentinel-2) in Verbindung mit geostationären Beobachtungen (von MSG und MTG) Grundlagenforschung über die Entstehung von kleinräumigen Wolkenstrukturen zu initialisieren. Ein Anfang stellt hier die oben geschilderte Fallstudie dar (Carbajal Henken *et al.* 2015).

Durch den neuen Kanal im nahen Infrarot kann das WadaMo Verfahren auch auf den geostationären Satelliten MTG angewendet werden. Dadurch sind Studien über den Tagesgang des TCWV möglich.

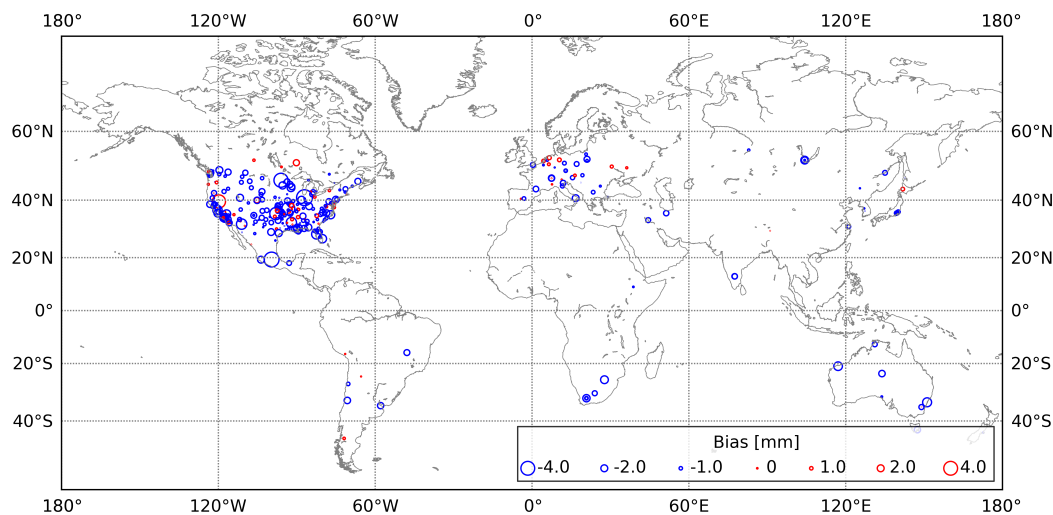


Abbildung 2.8: Karte des Bias zwischen MODIS TCWV Werten und GNSS TCWV in mm (GNSS-MODIS). Positive Werte (rote Kreise) geben dann, dass GNSS generell größer ist als die MODIS Werte.

2.3 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens

Es sind keine aktuellen Aktivitäten bekannt die die Implementierung von Ableitungsverfahren von Wasserdampfsäulengehalten über wolkenfreien Landoberflächen vorsehen, die Radianzmessungen im nahen Infrarot verwenden und somit Auflösungen von wenigen hundert Metern erreichen.

2.4 Veröffentlichungen

Neben der Teilnahme an nationalen und internationalen Konferenzen (wie z.B. ESA Living Planet Symposium 2014 in Edinburgh oder GEWEX G-VAP workshop 2014 in Berlin) gingen aus dem WadaMo Projekt zwei Veröffentlichungen in internationalen Journals hervor:

Diedrich, H., Preusker, R., Lindstrot, R., and Fischer, J. (2015). Retrieval of daytime total columnar water vapour from modis measurements over land surfaces. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(2), 823–836.

Carbajal Henken, C. K., Diedrich, H., Preusker, R., and Fischer, J. (2015). MERIS full-resolution total column water vapor: observing horizontal convective rolls. *Geophys. Res. Lett.*

Berichterstattung Drei Zwischenberichte und ein ATBD wurden im Projekt angefertigt.

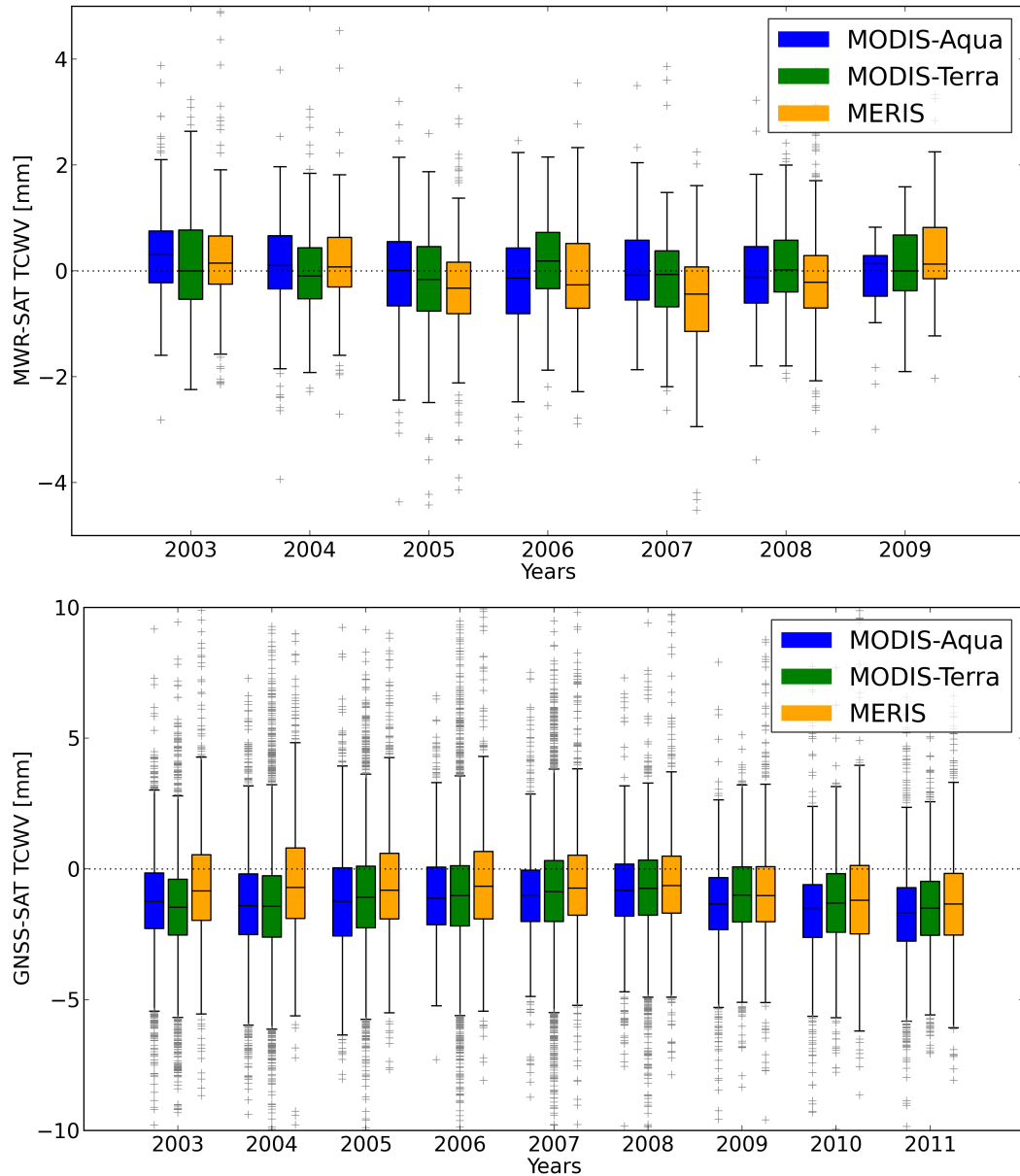


Abbildung 2.9: Boxplot des jährlich gemittelten Bias in mm zwischen TCWV abgeleitet von MODIS (blaue Boxen: Aqua, grüne Boxen: Terra) und MERIS (orangefarbige Boxen) und bodengestützten Beobachtungen (oben: MWR, unten: GNSS)

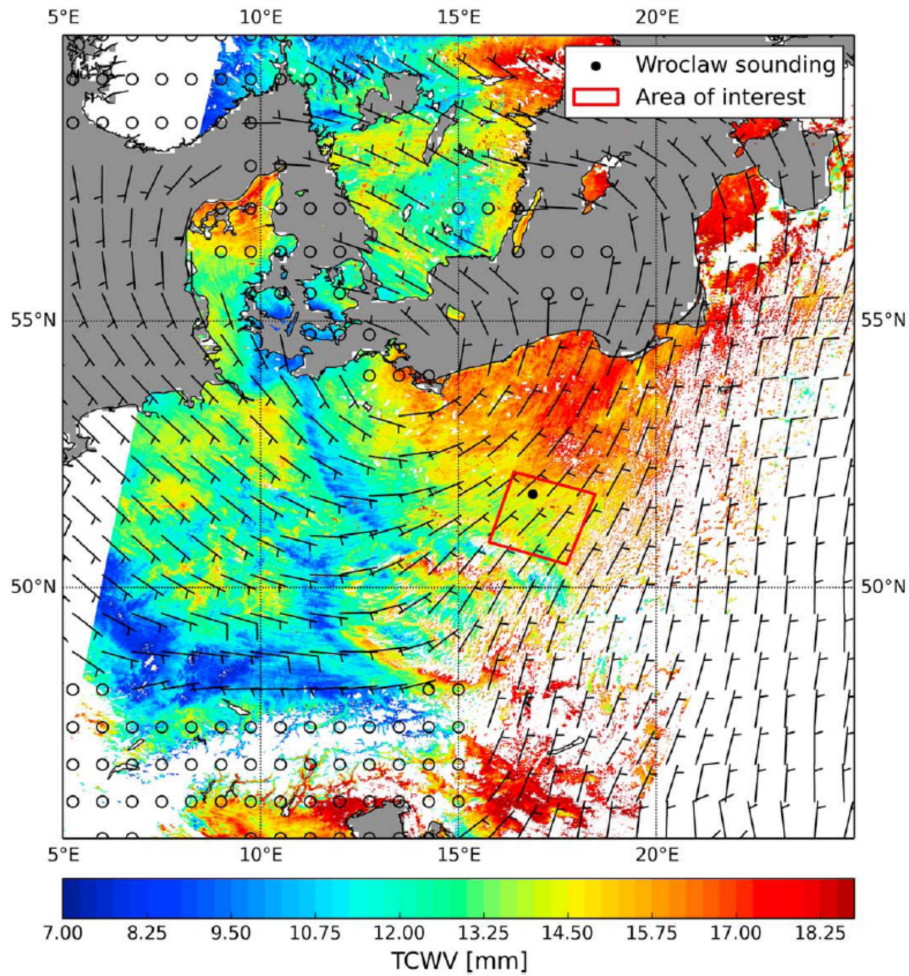


Abbildung 2.10: MERIS Wasserdampfsäulengehalte und mittlerer Wind in der Grenzschicht.

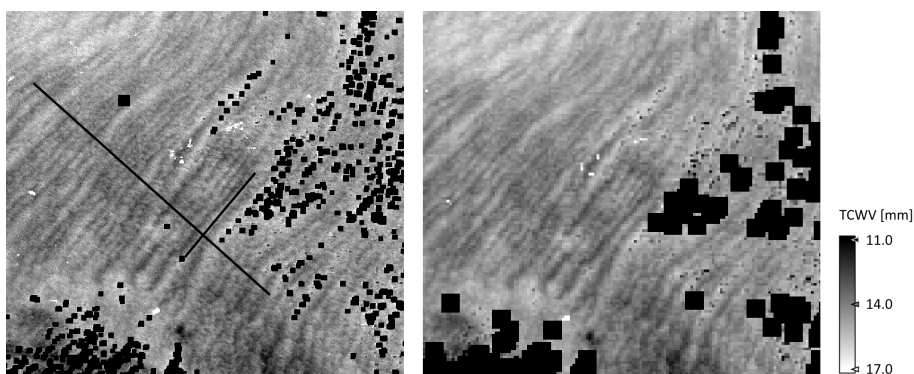


Abbildung 2.11: MERIS Wasserdampf für *Full Resolution* (260 m x 290 m) links und *Reduced Resolution* (1 km x 1 km) rechts als Zoom in das Gebiet welches in Abbildung 2.10 durch das rote Kästchen gekennzeichnet ist.

Literaturverzeichnis

- Bennartz, R. and Fischer, J. (2000). A modified k-distribution approach applied to narrow band water vapour and oxygen absorption estimates in the near infrared. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **66**, 539–553.
- Carbajal Henken, C. K., Diedrich, H., Preusker, R., and Fischer, J. (2015). MERIS full-resolution total column water vapor: observing horizontal convective rolls. *Geophys. Res. Lett.*
- Clough, S. A., Shephard, M. W., Mlawer, E. J., Delamere, J. S., Iacono, M. J., Cady-Pereira, K., Boukabara, S., and Brown, P. D. (2005). Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **91**, 233–244.
- Diedrich, H., Preusker, R., Lindstrot, R., and Fischer, J. (2015). Retrieval of day-time total columnar water vapour from modis measurements over land surfaces. *Atmospheric Measurement Techniques*, **8**(2), 823–836.
- Doppler, L., Carbajal-Henken, C., Pelon, J., Ravetta, F., and Fischer, J. (2014a). Extension of radiative transfer code MOMO, matrix-operator model to the thermal infrared - Clear air validation by comparison to RTTOV and application to CALIPSO-IIR. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **144**, 49–67.
- Doppler, L., Preusker, R., Bennartz, R., and Fischer, J. (2014b). k-bin and k-IR: k-distribution methods without correlation approximation for non-fixed instrument response function and extension to the thermal infrared / Applications to satellite remote sensing. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **133**, 382–395.
- Fell, F. and Fischer, J. (2001). Numerical simulation of the light field in the atmosphere-ocean system using the matrix-operator method. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **69**, 351–388.
- Fischer, J. and Grassl, H. (1984). Radiative transfer in an atmosphere-ocean system: an azimuthally dependent matrix-operator approach. *Applied Optics*, **23**, 1032–1039.
- Gao, B.-C. and Kaufman, Y. J. (2003). Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, **108**, 4389.
- Hollstein, A. and Fischer, J. (2012). Radiative transfer solutions for coupled atmosphere ocean systems using the matrix operator technique. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **113**, 536–548.

- Lindstrot, R., Preusker, R., Diedrich, H., Doppler, L., Bennartz, R., and Fischer, J. (2012). 1D-Var retrieval of daytime total columnar water vapour from MERIS measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, **5**, 631–646.
- Pérez-Ramírez, D., Whiteman, D. N., Smirnov, A., Lyamani, H., Holben, B. N., Pinker, R., Andrade, M., and Alados-Arboledas, L. (2014). Evaluation of AERONET precipitable water vapor versus microwave radiometry, GPS, and radiosondes at ARM sites. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, **119**, 9596–9613.
- Rodgers, C. (2000). *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*. World Scientific Pub Co.
- Rothman, L. S., Rinsland, C. P., Goldman, A., Massie, S. T., Edwards, D. P., Flaud, J.-M., Perrin, A., Camy-Peyret, C., Dana, V., Mandin, J.-Y., Schroeder, J., McCann, A., Gamache, R. R., Wattson, R. B., Yoshino, K., Chance, K., Jucks, K., Brown, L. R., Nemtchinov, V., and Varanasi, P. (2010). Reprint of: The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN Atmospheric Workstation): 1996 edition. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **111**, 1568–1613.

Erfolgskontrollbericht

Inhalt

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen.....	1
2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens.....	1
3. Fortschreibung des Verwertungsplans.....	1
4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben.....	1
5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer.....	1
6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung.....	2

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Das WadaMo Projekt bezieht sich auf den Förderschwerpunkt B („Innovative, anwendungsorientierte Forschung zur Bild- und Signalverarbeitung sowie –auswertung“), wobei aber auch ein wesentlicher Aspekt des Förderschwerpunkts A („Methodische Untersuchungen zur Entwicklung und Verbesserung innovativer Dienstleistungen“) adressiert wird.

- Zu **A**: Das WadaMo Verfahren ermöglicht erstmals eine globale, qualitativ hochwertige klimatologische Zeitreihe des Wasserdampfsäulengehaltes über Landflächen. Es kann daher die *„Monitoring Aufgaben im Kontext der Umsetzung Europäischer Richtlinien und Internationaler Konventionen und Programme z. B. ... Klimawandel...“* unterstützen.
- Zu **B**: Das Projekt beinhaltet eine innovative und hochgenaue Methode zur Fernerkundung des *atmosphärenphysikalischen Parameters* Wasserdampf. Ein zentraler Aspekt des Verfahrens ist die schnelle und sehr genaue Parametrisierung der *Strahlungstransportmodellierung*, ohne die ein operationeller Einsatz unmöglich wäre. Bisherige Erfahrungen mit MERIS zeigen, dass die anvisierten hohen Genauigkeiten nur erreicht werden können, wenn die verwendeten Kanäle der jeweiligen Instrumente präziser charakterisiert werden, als sie spezifiziert sind. Dadurch verbessert sich auch ihre *radiometrische Korrektur*. Andere wissenschaftliche Untersuchungsgebiete (die inhaltlich Förderschwerpunkt B gehören) profitieren von den Wasserdampferten; im speziellen:
 - *Wolkencharakterisierung* (wann bilden sich in und aus heterogenen Wasserdampffeldern Wolkenfelder)-
 - *Aerosolcharakterisierung* (wie ändern sich Streueigenschaften von Aerosolen bei veränderter relativer Feuchte), damit verbessert sich auch *Atmosphärenkorrektur* im sichtbaren.
 - *Atmosphärenkorrektur* (bessere Korrektur des *wet delay* durch troposphärischen Wasserdampf) von SAR-Aufnahmen

2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens

Siehe auch Schlussbericht Kapitel 2.1

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

s. Schlussbericht Kapitel 2.3

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Bis jetzt ist der wahre Grund für die Abweichungen des unkorrigierten WadaMo Verfahrens nicht bekannt. Es wird weiter nach Lösungen gesucht, damit der Prozessor auch ohne die Verwendung von Korrekturkoeffizienten hohe Genauigkeiten liefert. Die Verbesserung der Berechnung der Wasserdampfabsorption im Vorwärtsoperator wird angestrebt.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

WadaMo wird weiterhin auf internationalen Konferenzen und Fachtagungen präsentiert.

z.B. auf dem ESA Living Planet Symposium, Prag, 9.-13. Mai 2016

6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung.

Der Bewilligungszeitraum des Projekts wurde kostenneutral bis zum 30.09.2015 verlängert. Es wurden alle Arbeiten in diesem Zeitraum, wie geplant abgeschlossen.

Berichtsblatt

1) geplant

2) Schlussbericht

3) WadaMo - Fernerkundung des Wasserdampfsäulengehaltes
mit Hilfe inverser Modellierung

4) Hannes Diedrich, René Preusker

5) September 2015

6)

7) Z.B.: Fachzeitschrift

8) Freie Universität Berlin
Fachbereich Geowissenschaften
Institut für Weltraumwissenschaften
Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10
D-12165 Berlin

9)

10) 50 EE 1221

11a) 18

11b)

12)

13)
Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt
e.V.
Königswinterer Str. 522-524
53227 Bonn

14) keine

15) 11

16)

17)

18)

1. Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik

Die Fernerkundung von Wasserdampfsäulengehalten über wolkenfreien Landoberflächen mit abbildenden satellitengestützten Spektrometern, die von der Erde reflektiertes Sonnenlicht im nahen Infrarot auswerten, ermöglicht hohe Genauigkeiten und räumliche Auflösungen von bis zu wenigen hundert Metern. FUB arbeitet seit Jahren an Verfahren zum Ableiten von Säulenwasserdampfgehalten.

2. Begründung/Zielsetzung der Untersuchung

In naher Zukunft werden mehrere Satellitenmissionen gestartet, welche Spektrometer beinhalten, die im nahen Infrarot messen, wie z.B. der Nachfolger von MERIS, OLCI auf Sentinel-3, oder Sentinel-2, MTG, METImage, EnMap. Das Ziel des WadaMo Projekts ist es, ein Verfahren zur Fernerkundung von Wasserdampfsäulengehalten zu entwickeln, welches mit geringem Aufwand auf alle genannten Spektrometer adaptiert werden kann.

3. Methode

Im Projekt WadaMo wurde ein Wasserdampferkundungsverfahren entwickelt, welches mit Hilfe einer optimal estimation Methode Wasserdampfsäulengehalte aus Radianzmessungen in der Wasserdampfabsorptionsbande um 950nm ermittelt. Der Prozessor gibt ebenfalls Unsicherheiten für jedes Pixel zurück. Für den Vorwärtsoperator wurden umfangreiche Strahlungstransportsimulationen mit dem Matrix Operator Modell MOMO durchgeführt und tabelliert.

4. Ergebnis

Das WadaMo Verfahren wurde entwickelt und auf MERIS und MODIS adaptiert. Die Verfahren wurden mit mehreren bodengestützten Datensätzen von Säulenwasserdampfgehalten verglichen. Es ergeben sich kleine Abweichungen, welche mit sensorabhängigen Faktoren im Vorwärtsoperator korrigiert wurden. Das Verfahren wurde in die open-source Softwaretoolbox BEAM von Brockmann Consult implementiert und steht somit einer breiten Anwendergemeinde zur Verfügung. Erste Studien über kleinräumige Strukturen im Wasserdampffeld wurden angefertigt.

5. Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten

Das WadaMo Verfahren wird auf alle Instrumente adaptiert, die im nahen Infrarot messen. Somit kann die Zeitserie von Säulenwasserdampfgehalten dem gleichen Verfahren fortgeführt werden. Untersuchungen der kleinräumigen Wasserdampfvariabilität über lange Zeiträume sind somit möglich. Zusätzlich sind Studien über den Tagesgang des Wasserdampfs mit dem geostationären Satelliten MTG umsetzbar.

19) Fernerkundung des Wasserdampfsäulengehaltes, Sensor-unabhängiges Verfahren

20)

21)

Document Control Sheet

- 1) planned
- 2) final report
- 3) WadaMo – Remote sensing of total column water vapour with inverse modeling
- 4) Hannes Diedrich, René Preusker
- 5) September 2015
- 6)
- 7) scientific journal
- 8) Freie Universität Berlin
Fachbereich Geowissenschaften
Institut für Weltraumwissenschaften
Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10
D-12165 Berlin
- 9)
- 10) 50 EE 1221
- 11a) 18
- 11b)
- 12)
- 13)
Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt
e.V.
Königswinterer Str. 522-524
53227 Bonn
- 14) keine
- 15) 11
- 16)
- 17)
- 18)

1. State of the art

Remote sensing of total column water vapour over cloud-free land surfaces with space borne imaging spectrometers, that analyse reflected sunlight in the near infrared enable high accuracies and spatial resolutions up to a few hundred meters. FUB is working on algorithms for remote sensing of total column water vapour for years.

2. Objective

In the near future multiple satellite missions will be launched that contain spectrometer which measure in the near infrared, e.g. the follower of MERIS, OLCI on Sentinel-3, or Sentinel-2, MTG, METimage, EnMap. The goal of the WadaMo project is to develop an algorithm for the remote sensing of total column water vapour that can be adapted to these sensors with reasonable effort.

3. Method

In the WadaMo project an algorithm for the remote sensing of water vapour has been developed, which determines total column water vapour from radiance measurements in the water vapour absorption band around 950nm using an optimal estimation method. The processor also provides uncertainties on a pixel-basis. For the forward operator, extensive radiative transfer simulations were performed and tabulated with the Matrix Operator model MOMO.

4. Results

The WadaMo algorithm has been developed and adapted to MERIS and MODIS. The method was compared to ground based data sets of total column water vapour. The comparison reveals small deviations, which have been eliminated with sensor dependent factors in the forward operator. The processor was implemented into the open-source software toolbox BEAM from Brockmann Consult and is now available for a broad community of users. First studies about small scale variations in the water vapour field were performed.

5. Conclusion/Application

The WadaMo algorithm will be adapted to all instruments that measure in the near infrared. Consequently, the time series of total column water vapour can be continued with the same processor. Therefore, investigations about the small scale variability of water vapour over long time periods are possible. Additionally, studies about the diurnal cycle of water vapour are feasible with the geostationary satellite MTG.

19)

remote sensing of total column water vapour, sensor independent method

20)

21)