

Verbundschlussbericht im BMBF Forschungsvorhaben

Wolken- und Niederschlagsprozesse im Klimasystem

HD(CP)²

Verbundvorhaben O4: *HD(CP)² Observational*

Prototype Experiment HOPE

Eingereicht von der Projektkoordination am Leibniz-Institut für
Troposphärenforschung (TROPOS)

mit Beiträgen von

Norbert Kalthoff, Vera Maurer (Teilprojekt 1, FKZ 01LK1212F), KIT

Andreas Behrendt, Volker Wulfmeyer, (Teilprojekt 2, FKZ 01LK1212A),
Universität Hohenheim

Andreas Macke, Patric Seifert (Teilprojekte 3 und 5, FKZ 01LK1212C), TROPOS

Christoph Beekmann, Clemens Simmer (Teilprojekt 4, FKZ 01LK1212B),
Universität Bonn

Stefan Kinne, (Teilprojekt 4 FKZ 01LK1212E), MPI-Meteorologie

Projektkoordinator: Prof. Andreas Macke

Projektlaufzeit 1. Oktober 2012 - 31. Dezember 2015, kostenneutral verlängert bis 31. März
2016

Inhaltsverzeichnis

1 Das Projekt O4 in HD(CP)²

- 1.1 Übergeordnete Ziele
- 1.2 Zusammensetzung des Verbundes

2 Übersicht der erreichten Hauptziele

- 2.1 Vorbereitung der Intensivmesskampagne HD(CP)² Observational Prototype Experiment HOPE (TROPOS, KIT, IPM, MIUB, MPI-M)
- 2.2 Durchführung der Intensivmesskampagne HD(CP)² Observational Prototype Experiment HOPE (TROPOS, KIT, IPM, MIUB, MPI-M)
- 2.3 Qualitätskontrolle und Bereitstellung der Daten (TROPOS, KIT, IPM, MIUB, MPI-M)
- 2.4 Erstellung von Level-2 Produkten sowie Prozessstudien (TROPOS, KIT, IPM, MIUB, MPI-M)

3 Eingehende Darstellung der Arbeiten der einzelnen Teilprojekte

- 3.1 TP1: Oberflächen- und Grenzschichtenergieflüsse (KIT, IPM)
- 3.2 TP2: Planetare Grenzschicht (IPM, KIT)
- 3.3 TP3: Mikrophysikalische Eigenschaften von Aerosolen und Wolken (TROPOS)
- 3.4 TP4: Makrophysikalische Eigenschaften von Wolken (MIUB)
- 3.5 TP5: Solare Strahlungsflüsse und Strahlungsschließung (TROPOS)

4 Aussichten und Rolle in HD(CP)² Phase 2

Literaturverzeichnis

1 Das Projekt O4 in HD(CP)²

Das HD(CP)² Projekt zielt auf einen Durchbruch in der Simulation von Wolken- und Niederschlagsprozessen, indem untersucht wird, wie unterschiedliche Umsetzungen der Prozesse auf den relevanten raumzeitlichen Skalen zur Gesamtgüte der Simulationen beitragen. Das Projekt O4 wurde entworfen um im Rahmen einer Intensivmesskampagne "HD(CP)² Observational Prototype Experiment HOPE" eine kritische Modell-Evaluierung auf den Modellskalen zu ermöglichen, und um darüberhinaus Informationen innerhalb der Gittergrößen und der mikrophysikalischen Eigenschaften zu erhalten, die selbst in hochaufgelösten Modellen Gegenstand von Parametrisierungen sind. Das Projekt O4 zielte auf die Entstehung von Wolken und Niederschlag in der atmosphärischen Grenzschicht. Durch die Erfassung der räumlichen Wolkenverteilung wurden die Untersuchungen zu Wolken-Überlapp und zu 3D-Strahlungseffekten ermöglicht. Hochaufgelöste aktive und passive Fernerkundung ergab eine bislang unerreichte Erfassung der Energieflüsse und der turbulenten Grenzschicht-Struktur. O4 hat auf ideale Art und Weise die großskalige raumzeitliche Erfassung des Gesamtbeobachtungsgebietes (Projekt O2) und die Aktivitäten der Dauermessungen an den "Supersites" (Projekt O1) ergänzt. Daten aus O4 wurden im Integrationsprojekt O3 zur Modell-Evaluierung angewendet. Die Ergebnisse von HOPE wurden im Rahmen einer Sonderausgabe der Zeitschrift "Atmospheric Chemistry and Physics" ACP koordiniert inklusive eines Übersichtsartikels (Macke et al. 2017) veröffentlicht und alle Daten den HD(CP)² Datenbanken übergeben. Die Ergebnisse von HOPE werden intensiv in der 2. Phase von HD(CP)² zu Prozessstudien und Modell-Evaluierungen genutzt.

1.1 Übergeordnete Ziele

Im Verbundprojekt O4 sollten vertikal-auflösende und räumlich-abtastende, bodengebundene Fernerkundungsbeobachtungen für eine bestmögliche und kontinuierliche Charakterisierung der atmosphärischen Säule über ausgewählten Supersites genutzt werden. Um aus Fernerkundungsbeobachtungen quantitative Werte über den Zustand der Atmosphäre zu bekommen, wurden mathematisch-physikalische Methoden entwickelt und angewendet ("Retrieval") um aus den direkten Beobachtungen atmosphärische Variablen abzuleiten. Die Synergie von an den Supersites vorhandenen neuartigen Fernerkundungsbeobachtungen liefert hier wertvolle Zwangsbedingungen, um ein physikalisch-konsistentes Bild der Atmosphäre abzubilden.

1.2 Zusammensetzung des Verbundes

Das Verbundprojekt O4 setzte sich aus fünf Partnern zusammen, alle mit einem starken wissenschaftlichen Hintergrund im Bereich bodengebundener Fernerkundung der Atmosphäre:

1. Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) Leipzig: Schwerpunkt Aerosol- und Wolkenfernerkundung, Strahlungsbilanzmessung
2. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Meteorologie und Klimaforschung (KIT): Schwerpunkt Atmosphärenfernerkundung und Energiebilanzmessung
3. Universität Hohenheim, Institut für Physik und Meteorologie (IPM): Schwerpunkt Lidarfernerkundung von turbulenten Energieflüssen
4. Meteorologisches Institut Universität Bonn (MIUB): Schwerpunkt Fernerkundung von Wolkenstrukturen
5. Max-Planck Institut für Meteorologie (MPI-M): Schwerpunkt Lidarfernerkundung von Aerosol und Thermodynamik

durchgeführt. Hier gelang der gleichzeitige Einsatz der hubschraubergetragenen Messsonde ACTOS und der bodengebundene Aerosol- und Wolkenfernerkundung, und damit ein Vergleich von Direktmessung und Fernerkundung von Dynamik, aerosol- und wolkenmikrophysikalischer Eigenschaften. Insgesamt sind beide HOPE Kampagnen erfolgreich und mit weitgehend durchgängigen Messungen nahezu aller Systeme durchgeführt worden.

Beim ersten Projekttreffen vom 23.-24.07.2012 wurde das 8 Wochen umfassende Feldexperiment HOPE-Jülich geplant. Der Fokus der weiteren Projekttreffen lag auf der Koordination der Datenauswertung und -Interpretation zwischen den Partnern. Um aus den Messungen des HD(CP)² Prototyp Experiments erhaltene wissenschaftliche Ergebnisse kompakt präsentieren zu können, wurde ein Sonderband im Journal of Atmospheric Chemistry and Physics eingerichtet (Macke et al, 2017).

Tabelle 2: Auflistung der Intensive Observations Periods (IOP) während HOPE-Jülich und HOPE-Melpitz.

IOP No.	Date	sky situation
HOPE-Jülich		
1	April 13	broken convective clouds
2	April 14	low-cloud deck until noon, broken cirrus in the afternoon
3	April 15	convective clouds, precipitation
4	April 18	few PBL clouds, broken cirrus
5	April 20	clear
6	April 24	clear
7	April 25	PBL clouds
8	April 26	frontal clouds, precipitation
9	April 29	weak convection
10	May 2	high aerosol load, cumulus
11	May 4	clear
12	May 5	PBL clouds
13	May 18	scattered clouds
14	May 19	scattered clouds
15	May 24	PBL convection in cold air mass
16	May 25	convective clouds, warm-front and precipitation in the evening
17	May 27	scattered clouds
18	May 28	Scattered clouds, complex scenario
HOPE-Melpitz		
19	September 13	Cu clouds
20	September 14	polluted air, clear skies, Cu
21	September 17	clean air, Cu
22	September 21	Cu convection, drizzling Sc decoupled from PBL
23	September 22	Sc decoupled from PBL
24	September 27	Cu convection, very low PBL

2.3 Qualitätskontrolle und Bereitstellung der Daten (TROPOS, KIT, IPM, MIUB, MPI-M)

Die Qualitätskontrolle wurde von den teilnehmenden Projektpartnern und im Rahmen von Projekttreffen zum Datenvergleich erfolgreich durchgeführt. Alle Daten sind der HD(CP)²-Datenbank zugänglich gemacht worden. Alle Projektpartner haben ihre Ergebnisse in begutachteten Zeitschriften publiziert, zumeist in der Sonderausgabe zu HOPE in der Zeitschrift "Atmospheric Chemistry and Physics". An dieser Stelle sei ausdrücklich den beiden Gasteditoren Prof. Hermann Russchenberg (TU-Delft) und Prof. Stefan Bühler (Uni Hamburg) für die Übernahme und Durchführung dieses aufwändigen Ehrenamtes gedankt!

2.4 Erstellung von Level-2 Produkten sowie Prozessstudien (TROPOS, KIT, IPM, MIUB, MPI-M)

Die wissenschaftliche Auswertung der gesammelten Datensätze erfolgte im Rahmen der in Tabelle 1 aufgelisteten Hauptziele 4 und 5. Die Erstellung von Level-2 Produkten hatte zum Ziel für größere Zeiträume der Feldexperimente (IOPs), aus den gemessenen Level-1 Parametern höherwertige Produkte abzuleiten, die später für die Evaluierung des HDCP2 Modelles eingesetzt werden können. Für kürzere Zeiträume wurde die Auswertung von Prozessstudien angestrebt, die dazu beitragen, atmosphärische Prozesse in Wolken und in der planetaren Grenzschicht genauer zu verstehen. Beispiele für die Umsetzung der letztgenannten beiden Hauptziele finden sich in Kapitel 3.

3 Eingehende Darstellung der Arbeiten der einzelnen Teilprojekte

Es folgen eingehende Beschreibungen der Hauptergebnisse aus den einzelnen Teilvorhaben (TP1-TP5), die jeweils mit einem gesonderten FKZ (nur bei TP3 und TP5 gleiches FKZ) versehen sind. Für weitere, detailliertere Berichte wird auf die angegebenen Publikation und die Schlussberichte der einzelnen FKZ verwiesen.

3.1 TP1: Oberflächen- und Grenzschichtenergieflüsse (KIT, IPM)

Der Schwerpunkt in TP1 lag auf der Ableitung von Energieflüssen am Boden aus klassischen Energiebilanzmessungen (Strahlung, sensible und latente Wärme) sowie turbulenten Wärmeflüssen aus zeitlich hochaufgelösten Wärmeflussmessungen. Die für TP1 relevanten Prozesse sind im Einzelnen

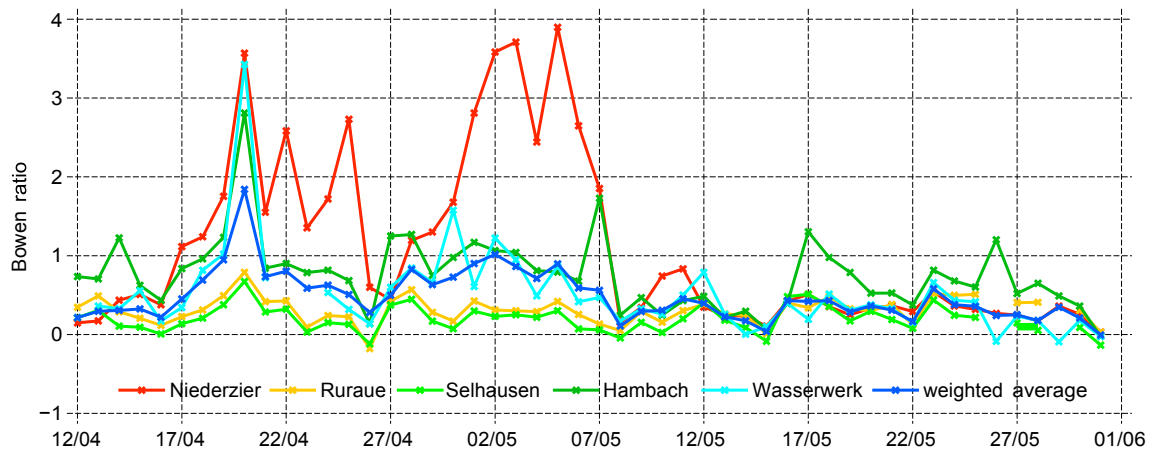
- der Einfluss der Heterogenität der Landoberfläche,
- Turbulenzcharakteristika in der konvektiven Grenzschicht und
- die hochaufgelöste Variabilität dynamischer sowie thermodynamischer Eigenschaften.

Die hierfür zu messenden Größen sind die Energiebilanzkomponenten, mittlere und turbulente Eigenschaften der Grenzschicht mit und ohne Bewölkung, sowie, ergänzend zu den anderen Teilprojekten, Wolken und Niederschlag, alles mit Hilfe des mobilen Beobachtungssystems KITcube. KITcube wurde entwickelt, um physikalische Prozesse zu untersuchen, die in der atmosphärischen Grenzschicht stattfinden sowie zur Konvektionsauslösung bis hin zur Wolken- und Niederschlagsbildung beitragen (Kalthoff *et al.*, 2013a). Diese Prozesse umfassen mehrere Skalen, von der Mikro- bis zur Mesoskala. Der KITcube setzt sich aus verschiedenen Messgeräten wie Turbulenzmasten, Energiebilanzstationen und bodengebundenen Fernerkundungsgeräten auf dem neuesten Stand der Technik zusammen und ist damit bestens geeignet, um die auf diesen Skalen ablaufenden Prozesse zu verfolgen und aufzuzeichnen.

Während der Messkampagne im April und Mai 2013 wurden vom KIT umfangreiche Messungen am Hauptstandort Hambach durchgeführt. Außerdem haben sich Mitarbeiter des KIT intensiv an der Koordinierung der Messkampagne beteiligt. Die Tätigkeiten umfassten unter anderem den Betrieb und die Überwachung der installierten Messstationen, die Koordinierung von abgestimmten Messungen (gemeinsame Scans von Lidar, Feuchteprofiler und X-Band Radar) mit anderen Gruppen; die Durchführung der Radiosondenaufstiege an Intensivmesstagen und täglich um 12 UTC (die routinemäßigen nächtlichen Aufstiege um 00 UTC wurden von Studenten der Universitäten Bonn und Köln übernommen); die interne Datensicherung; Science- und Operation-Direktor-Aufgaben (Wetterbesprechung, Festlegung von Intensivmesstagen, Nachbesprechung von Intensivmesstagen); sowie die Erstellung von Protokollen und Übersichten über die jeweiligen Intensivmesstage. Insgesamt wurden 21 Intensivmesskampagnen (IOPs) mit unterschiedlichen Scanmustern / Messkonfigurationen erfolgreich durchgeführt.

Zur Bestimmung der Boden- und Grenzschichteigenschaften war insbesondere die räumliche Variabilität der Bodeneigenschaften von Bedeutung. Zur näheren Untersuchung der räumlichen Variabilität während HOPE wurden die turbulenten Wärmeflüsse, die an fünf Stationen innerhalb eines etwa $10 \times 10 \text{ km}^2$ großen Gebietes gemessen wurden, analysiert. Abb. 1 zeigt exemplarisch das Bowen-Verhältnis (Verhältnis des fühlbaren zum latenten Wärmestrom) und den Niederschlag für nahezu den gesamten Kampagnenzeitraum dar.

a) Bowen-Verhältnis



b) Niederschlag

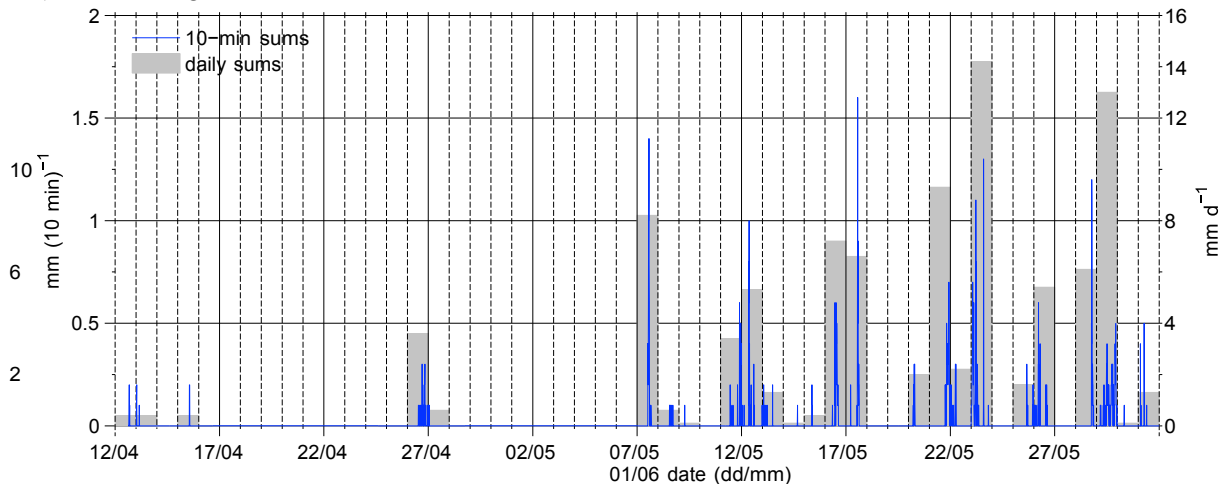


Abbildung 1: (a) Bowen-Verhältnis für alle verfügbaren Energiebilanzstationen sowie für die gewichtet gemittelten turbulenten Flüsse (gewichtet mit dem Gebietsanteil der jeweiligen Landnutzung), berechnet für Tagesmittelwerte (09–15 UTC) der turbulenten Flüsse; (b) am Wasserwerk gemessener Niederschlag.

Weiterhin wurden für ausgewählte Tage mit Hilfe der Lidarsysteme in Zusammenarbeit mit dem IPM die Turbulenzcharakteristika bestimmt und interpretiert. Zuerst wurde untersucht, ob die festgestellte Heterogenität der Landoberfläche einen Einfluss auf diese hat. Dafür wurden aus den Vertikalwindmessungen durch die Doppler-Lidargeräte an mehreren Standorten Varianzprofile einschließlich einer ausführlichen Fehleranalyse berechnet.

Insgesamt ist in Rahmen des Teilprojektes eine ausführliche Charakterisierung der Bodenflüsse und Grenzschichtturbulenz gelungen, mit der bereits erste Modell-Evaluierungen stattgefunden haben und weitere folgen werden.

3.2 TP2: Planetare Grenzschicht (IPM, KIT)

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war die verfeinerte Beobachtung und Beurteilung der thermodynamischen Felder in der konvektiven Grenzschicht (CBL) und unteren freien Troposphäre. Zusätzlich zu vertikal gerichteten Messungen wurden 3-dimensionale Scans zur Untersuchung der

mesoskaligen Variabilität eingesetzt. Der während HOPE erstmalig gesammelte umfassende Datensatz erlaubte nicht nur die Untersuchung der gemittelten thermodynamischen Felder in der HOPE-Region (Hammann et al., 2015, Späth et al. 2016) sondern auch erstmals die gleichzeitige Untersuchung der turbulenten Fluktuationen der thermodynamischen Größen Temperatur, Feuchte und Vertikalwind über die gesamte CBL (Behrendt et al, 2015a; Muppa et al., 2016). Aus diesen Daten ließen sich dann höhere Momente und Kovarianzen (Flüsse) ableiten. Hierfür wurden neu entwickelte Analysewerkzeuge verwendet (Wulfmeyer et al., 2016). Aufgrund der niedrigen statistischen Messunsicherheit der Lidardaten konnten zusätzlich sogar Flüsse von höheren Momenten und die Eddy-Dissipations-Rate ermittelt werden. Die neuen Messdaten stehen nun zur Validierung und Verbesserung von Large-Eddy-Simulationen (LES) zur Verfügung, was wiederum unerlässlich für die Verbesserung der Turbulenz-Parametrisierung ist.

Die oben erwähnten 3-dimensionalen Daten thermodynamischer Felder, turbulenten Fluktuationen und Kovarianzen wurden während des HOPE-Experiments im Frühjahr 2013 mittels zweier Lidarsysteme der Universität Hohenheim erhoben: dem Rotations-Ramanlidar (RRL) für Temperaturmessungen und dem Differentiellen Absorptionslidar (DIAL) zur Messung der absoluten Feuchte. Diese beiden weltweit einzigartigen Systeme, die an der Universität Hohenheim in den letzten Jahren entwickelt wurden, wurden bei HOPE mit einem Doppler-Lidar des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) am selben Messplatz kombiniert; an zwei weiteren HOPE-Messplätzen waren vertikal gerichtete Lidarsysteme aufgebaut wie u.a. das BASIL-System der Universität von Basilicata (Italien). Mit dieser neuen Kombination von Fernerkundungssystemen konnten erstmals die Variabilität der oben aufgeführten Daten gleichzeitig auf einer Skala von wenigen Kilometern beobachtet werden. Beide UHOH-Systeme haben eine intrinsisch hohe räumliche und zeitliche Auflösung von wenigen Sekunden und Metern. Die Messdaten bieten dadurch einzigartige Möglichkeiten zur Validierung des im Projekt eingesetzten hochaufgelösten numerischen Atmosphärenmodells ICON (Heinze et al., 2016a,b). Unsere Untersuchung wird ebenso den potentiellen Einfluss von Landoberflächen-Heterogenität auf mesoskalige Zirkulationen und von großskaligem Antrieb bezüglich Oberflächenflüssen durch Verfeinerung der Energiebilanzschließung mit einbeziehen.

Abb. 2 zeigt exemplarisch die aus den Lidarmessungen ermittelten Vertikalprofile der Feuchtevarianz mit Rausch- und Stichprobenfehler für zwei IOPs (IOP5 und IOP6, siehe Tabelle 2) während HOPE. Insgesamt sind atmosphärische Variablen in der konvektiven Grenzschicht ermittelt worden, die entscheidend für die Turbulenzparametrisierung in Wetter- und Klimamodellen und für die Evaluierung von turbulenzauflösenden Modellen sind. Diese beinhalten die turbulenten Flüsse, Momente höherer Ordnung der Feuchte, der potentiellen Temperatur und des vertikalen Windes, sowie die Dissipationsraten. Theoretische Beziehungen zwischen den integralen Maßstäben, den Gradienten und Momenten höherer Ordnungen von atmosphärischen Variablen, Flüssen und Dissipationsraten sind entwickelt worden, mit hauptsächlichen Fokus auf die Übergangsschicht (Interfacial Layer, IL) an der CBL-Oberkante.

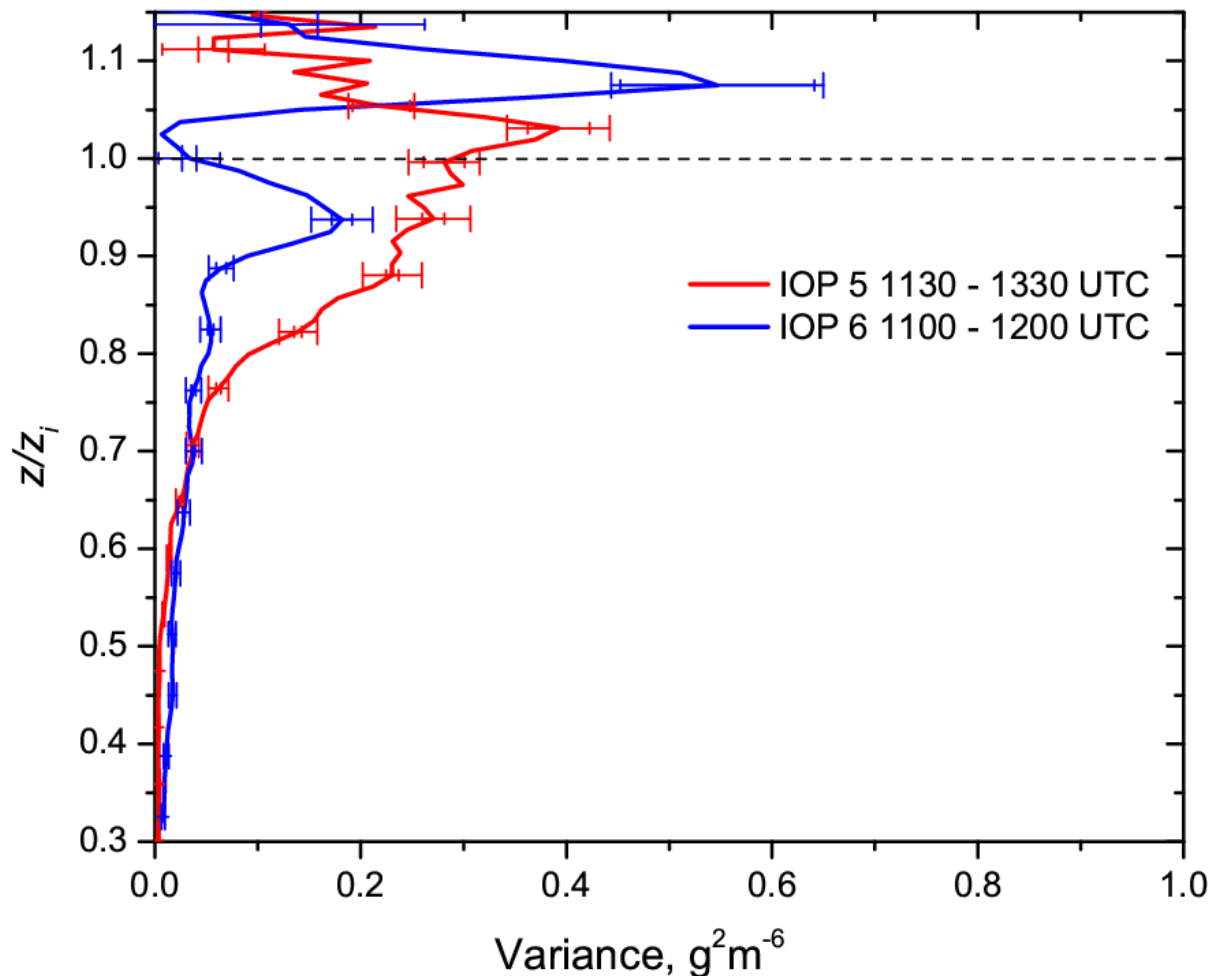


Abbildung 2 Vertikale Varianzprofile der absoluten Feuchte mit Rausch- und Stichprobenfehler für die Untersuchungszeiträume an IOP 5 und 6. (aus Muppa et al., 2016)

3.3 TP3: Mikrophysikalische Eigenschaften von Aerosolen und Wolken (TROPOS)

Dieses Teilvorhaben nutzte die Synergie von Lidar, Radar und Mikrowellenradiometer sowie in-situ Messungen um die mikrophysikalischen Eigenschaften von Aerosolen und Wolken zu ermitteln. TP3 umfasst den Einsatz der Messplattformen LACROS (bodengebundene Fernmessungen von Wolken, Aerosol und Turbulenz mit Radar, Ramanlidar, Windlidar, Laser-Ceilometer, Mikrowellenradiometer) und ACTOS (hubschraubergetragene Messung von Aerosol- und Wolkenmikrophysik und Turbulenz) sowie die Auswertung und Bereitstellung der Daten. ACTOS führt in-situ Beobachtungen der Wolkentropfengrößenverteilung, von Aerosoleigenschaften und von turbulenten Flüssen im Nahbereich der LACROS Messstation durch. Diese in-situ Daten dienen als Referenzdaten für aus den Fernerkundungsdaten bestimmte Aerosol- und Wolkeneigenschaften. Ziele der gemeinsamen Messungen von LACROS und ACTOS sind

- Statistischer Vergleich der Auf- und Abwinde in konvektiven Grenzschichtwolken
- Validierung verschiedener auf Radarmessungen basierender Algorithmen für die Bestimmung von Flüssigwassergehalt, Tropfengröße und -anzahlkonzentration in Wolken
- Validierung von lidarbasierten Techniken zur Bestimmung aerosolmikrophysikalischer Eigenschaften mittels in-situ Beobachtungen von Partikelgrößenverteilungen
- Vergleich von Feuchte und Temperaturprofilen
- Vergleich von Profilen des Flüssigwassergehaltes in Wolken mit Messungen des Flüssigwasserpfades vom Mikrowellenradiometer

Mit der Anschaffung eines 35-GHz Wolkenradars vom Typ Mira-35 der Firma Meteorologische Messtechnik GmbH (Metek) sowie eines Mikrowellenradiometers vom Typ HATPRO der Firma Radiometer Physics GmbH (RPG) im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes mit dem Forschungskennzeichen 01LP10011A im Jahr 2011 wurde die Voraussetzung geschaffen, im Rahmen des HD(CP)² Prototyp Experiments kontinuierliche Messungen der Aerosol- und Wolkenverteilung in der gesamten Troposphäre durchzuführen.

Der kontinuierliche Messbetrieb von LACROS ist in Abbildung 3 exemplarisch für den Zeitraum vom 24. bis 26. April 2013 dargestellt. An diesen drei Tagen wurden drei markante meteorologische Situationen abgedeckt. Der 24. und 25. April waren von einer Hochdruckwetterlage geprägt. Dadurch war es am 24. April bis auf das vereinzelte Auftreten von hoher Zirrusbewölkung wolkenlos und eine etwa 1.5 km hohe konvektive Grenzschicht konnte sich entwickeln. Die Entwicklung der konvektiven Grenzschicht ist dabei gut in Abb. 3 (unten) zu erkennen, die die mit dem Doppler Lidar WiLi beobachtete Vertikalwindgeschwindigkeit darstellt. Die Vertikalstruktur der Aerosolverteilung und von dünnen Flüssigwasserwolken wird vom Raman-polarisations Lidar Polly^{XT} (Abb. 3 oben) erfasst. Wolken und Niederschlag werden mit dem 35-GHz Wolkenradar Mira-35 (Abb. 3 mitte) detektiert. Am 25. April traten in der ersten Tageshälfte mittelhohe, von der Grenzschicht entkoppelte Wolken auf, während sich in der zweiten Tageshälfte Quellwolken an der Oberkante der planetaren Grenzschicht bildeten. Auch hier ist die turbulente Grenzschicht wieder gut in den Messungen des Doppler-Lidars (Abbildung 3 unten) zu erkennen. Im Verlauf des 26. April kam es zur Passage eines Warmfrontensystems, das zwischen 14 und 24 UTC zu Niederschlägen an der Messstation geführt hat.

Die in Abbildung 3 gezeigten in Kombination mit weiteren Messdaten bilden die Grundlage für die Erstellung von auf Synergien zwischen den Messgeräten basierende atmosphärische und wolkenmikrophysikalische Parameter.

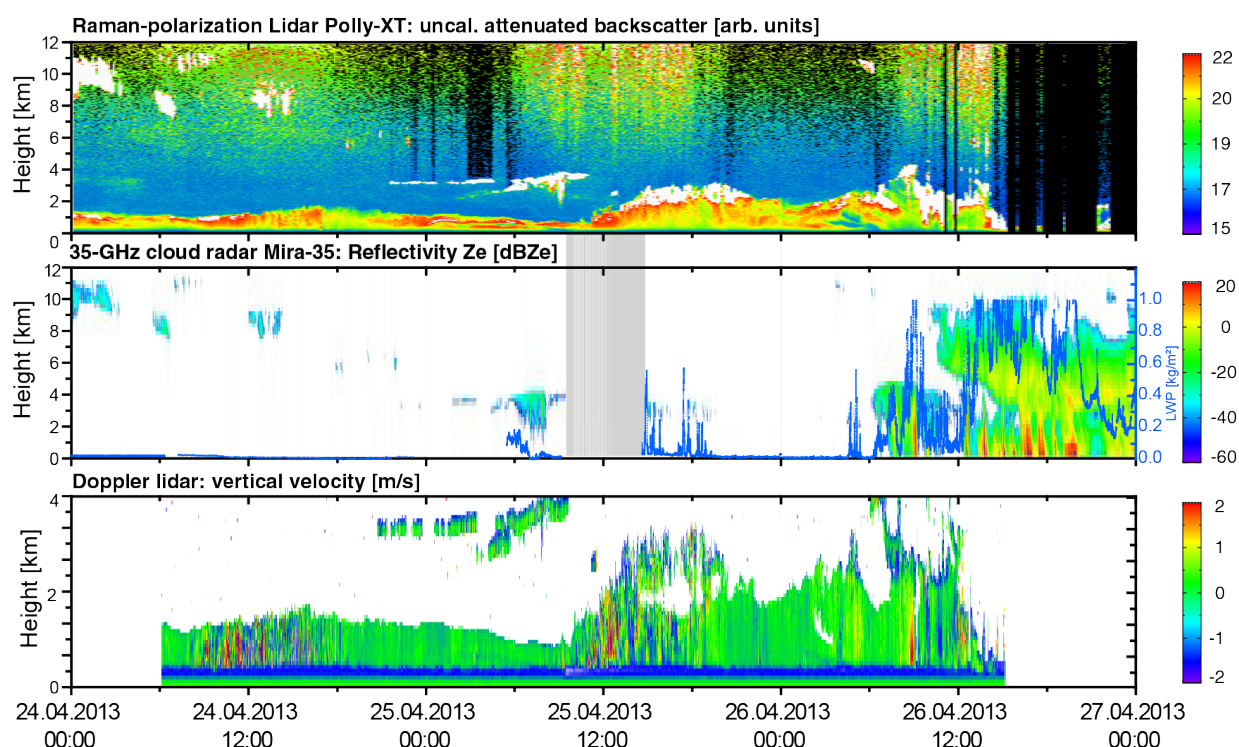


Abbildung 3: Kontinuierliche Beobachtung der Atmosphäre über 3 Messtage während HOPE-Jülich mit Messinstrumenten von LACROS. Oben: Erfassung der Aerosoleigenschaften mit dem Lidar PollyXT; Mitte: Beobachtung von Wolkenstrukturen mit dem Wolkenradar Mira-35; Unten: Messung des Vertikalwindes der Atmosphäre mit Doppler Lidar.

Der Schwerpunkt der Messungen während HOPE-Melpitz lag in der gemeinsamen Erfassung von Aerosolen und Wolken mit LACROS und ACTOS. Insgesamt 15 Stunden in-situ Daten wurden während HOPE-Melpitz mit ACTOS gesammelt.

Neben den mikrophysikalischen Eigenschaften lässt sich aus den gemeinsamen Vertikalwindmessungen

des Doppler Lidars von LACROS und von ACTOS die Genauigkeit der Vertikalwindmessung des Doppler Lidars in Flüssigwasserwolken untersuchen. Beide Messmethoden liefern nahezu die identische Standardabweichung der Vertikalwindgeschwindigkeit und sind damit prinzipiell für eine statistische Charakterisierung der Wolkendynamik in Schichtwolken sehr gut geeignet.

Als wertvolle Ergänzung zu der während HOPE-Jülich verfügbaren Instrumentierung, stand während HOPE-Melpitz auch eine umfangreiche in-situ Charakterisierung des bodennahen Aerosols zur Verfügung. Auf Basis der Aerosolmessungen am Boden und der in-situ Aerosolmessungen mit ACTOS, wurde eine optische Schließung mit den vom Polly^{XT} Lidar gemessenen optischen Aerosoleigenschaften durchgeführt. Aus der gemessenen Größenverteilung des trockenen Aerosols am Boden und in ACTOS Flughöhe wird mithilfe eines hygroskopischen Wachstumsfaktors eine Größenverteilung unter Umgebungsbedingungen bestimmt.

3.4 TP4: Makrophysikalische Eigenschaften von Wolken (MIUB)

In diesem Teilvorhaben sind mit Hilfe von stereoskopischen Kameraaufnahmen die geometrischen Eigenschaften von Wolkenrändern bestimmt worden. Die methodische Grundlage der kamerabasierten 3D-Rekonstruktion ist dabei die Stereophotogrammetrie, die mit jeweils zwei Kameras in einer passenden geometrischen Anordnung 3D-Informationen über die beobachtete Szene liefert. Eine Distanz von ca. 300 m zwischen einem Kamerapaar und eine Entfernung zu beobachtbaren Wolken im Messgebiet von ca. 1 bis 4 km hat sich dabei als adäquat herausgestellt um signifikante Teil der Wolkengeometrie zu erfassen.

Abb. 4 zeigt exemplarisch die Stereorekonstruktion vom IOP 18. April 2013 um 13:53:15 UTC bei flacher konvektiver Bewölkung und einen Vergleich der berechneten Wolkenhöhe mit dem Lidar-Ceilometer der JOYCE Messstation.

Die gewonnenen Geometriedaten können sowohl zum Zwecke der Validierung des ICON-Modell, als auch für weitere Studien der Wolken-Strahlungs-Interaktion genutzt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse über die Problematiken und Anforderungen eines effektiven Kamerasystems sind sehr wertvoll und sollen in den Aufbau eines permanenten Systems, z. Bsp. an der Supersite JOYCE bei Jülich münden. Neben der Verfeinerung und methodischen Weiterentwicklung, wird ein Schwerpunkt die Kombination des Systems mit anderen Messinstrumenten, wie z. Bsp. dem Wolkenradar sein, um eine umfassendere Repräsentation von Wolken zu erzielen.

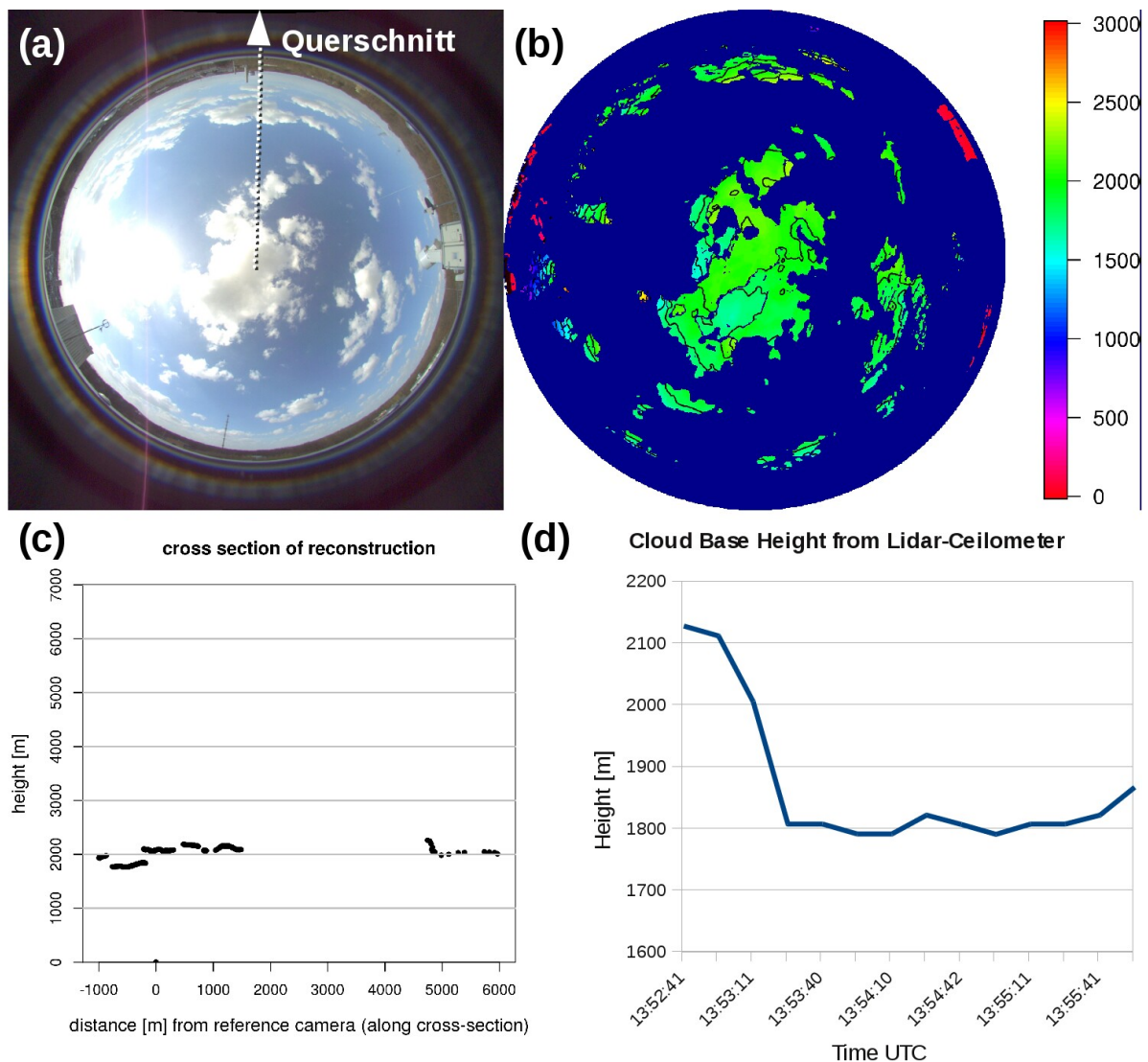


Abbildung 4: Stereorekonstruktion vom 18.04.2013 um 13:53:15 (UTC). Das aufgenommene Wolkenkamerabild (a) und die abgeleiteten Wolkenhöhen in Meter (b). Die Wolkenbasishöhe im Querschnitt der Rekonstruktion (c) passt gut zu der vom Lidar-Ceilometer abgeleiteten Wolkenhöhe (d).

Neben den Kameramessungen kamen auch Raman-Lidar- und NASA-Sonnenpotometermessungen des MPI-M zur Abschätzung der horizontalen Verteilung des Aerosols und der räumlichen Variabilität der Wolkenunterkanten zum Einsatz.

Das RAMAN-Lidar erstellte vertikale Profile von Aerosol und Wasserdampf (nur nachts) und die Höhen der turbulenten Grenzschicht sowie Untergrenzen von Wolken-Strukturen (auch in Ergänzung zu Wolken-Struktur Messungen des Wolken Radars der Universität Köln an der JOYCE Mess-Station in Jülich).

Die vier geliehenen Sonnenphotometer-Instrumente maßen Atmosphärenmittel der optischen Eigenschaften des Aerosols und des Wasserdampfgehaltes. Zwei der Instrumente wurden zentral neben den RAMAN Lidar Systemen von KIT und TROPOS aufgestellt, um die Geräte mit der Messung der Gesamt-Trübung durch Aerosole zu eichen aber auch um ergänzende Daten über Aerosole zu erhalten (wie die Größen-Verteilung). Die zwei anderen Instrumente wurden im Aufwind und Abwind in etwa 40km Entfernung aufgestellt, um großräumige Änderungen der Aerosol Eigenschaften zu kontrollieren.

Obwohl die Lidar Messungen nur für die 8-wöchige Feldmesskampagne HOPE erwartet wurden, wurden die Messungen (auch auf Wunsch der Koordination von Teilprojekt 3) bis in den Oktober hinein fortgesetzt. Diese Daten, die Profile von über ein halbes Jahr erfassen (26.April bis 22.Oktober 2013), wurden dann in den folgenden Jahren der Förderung für das Teilprojekt 4 ersten Qualitäts-Kontrollen unterzogen und sind zur weiteren Nutzung auf dem Internet dargestellt. Die mit Sonnenphotometern gemessenen Daten wurden Qualitätsfiltern unterzogen und mit (Korrektur- und Inversions-) Programmen der NASA in nutzerfreundliche Eigenschaften aufbereitet, die über das Internet abrufbar sind.

Die zeitliche Entwicklung der vom MPI-M Lidar hergeleiteten Grenzschicht stimmt generell gut überein mit denen ähnlicher Messungen (z.B. der anderer Lidar Systeme wie BASIL und TROPOS). Allerdings gibt es auch kleinere Unterschiede, wie eine höhere Grenzschicht am Morgen des 26.Aprils und eine niedrigere Grenzschicht am 27.April. Unter Berücksichtigung der Einschränkung, dass Lidar Systeme nicht tief in Wolken hineinschauen können, werden zumindest Untergrenzen größerer Wolken-Strukturen vom Lidar gut erkannt.

3.5 TP5: Solare Strahlungsflüsse und Strahlungsschließung (TROPOS)

Dieses Teilvorhaben zielte auf die Erfassung der hohen raumzeitlichen Variabilität der solaren Einstrahlung am Boden, wie sie hauptsächlich durch Wolken und teilweise durch Aerosol eines Pyranometer-Netzwerks (zur horizontal hochaufgelösten Erfassung der solaren Einstrahlung) und hervorgerufen werden.

Das Pyranometernetzwerk, bestehend aus 100 autonom messenden Pyranometern, ist Hauptbestandteil des Arbeitspaketes „Schließung“ des HD(CP)2 Prototyp Experiments. Die Pyranometer werden über das gesamte Experimentgebiet verteilt, um die kleinskalige Variabilität des wolkenbedingten Strahlungsantriebes am Boden zu beobachten. Die gemessenen Größen umfassen die räumliche und zeitliche Verteilung der abwärtsgerichteten breitbandigen solaren und thermischen Strahlung. Da der langwellige Strahlungsantrieb weniger sensitiv auf die raumzeitliche Variabilität der Bewölkung reagiert, wurde ein kleineres Netz aus Pyrgeometern installiert, um die Erfassung der Strahlungsbilanz zum komplettieren. Die Analyse und Qualitätssicherung der Messdaten des Pyranometer Netzwerkes von HOPE-Jülich und HOPE Melpitz wurde abgeschlossen und alle Daten wurden in das NetCDF Format konvertiert und in der HD(CP)2 Datenbank archiviert.

Die Ergebnisse der HOPE-Jülich Messungen sind in *Madhavan et al.* [2016] zusammengefasst. Zudem wurde eine Multi-Resolution Analyse der mit dem Pyranometernetzwerk während HOPE-Jülich beobachteten atmosphärischen Transmissivität durchgeführt, um die kleinskalige Variabilität unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen charakterisieren zu können. Anhand der Ergebnisse kann gezeigt werden, dass die Varianz der Zeitreihe der atmosphärischen Transmissivität stark von der Mittelungszeit abhängt.

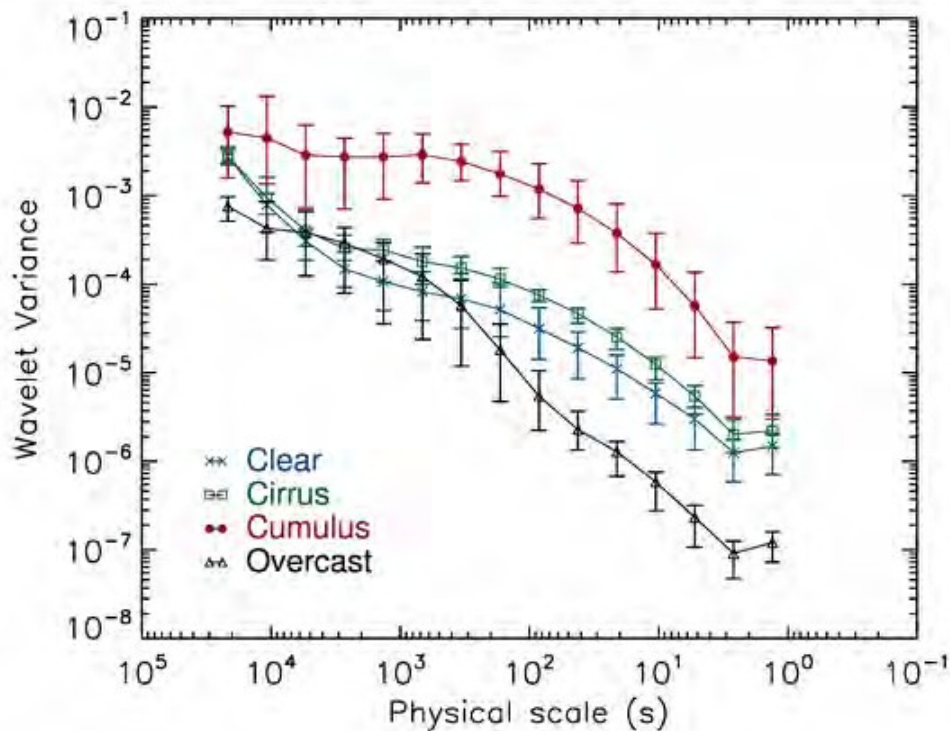


Abbildung 5: Wavelet-Varianz als Funktion verschiedener Zeitskalen und Bewölkungsbedingungen.

00:00 12:00 00:00 12:00 00:00 12:00 00:00

Aussichten und Rolle in HD(CP)² Phase 2

Die in dem Teilvorhaben O4 erbrachten Datensätze stellen den Zustand der bewölkten Grenzschichtnahen Atmosphäre in bislang nicht gekannter Komplexität und Auflösung dar. Auf dieser Basis werden in Phase 2 dezidierte Modellrechnungen zur Evaluierung des ICON Models vorgenommen.

Darüberhinaus werden die entwickelten Methoden in Phase 2 auf die deutschen und internationalen Supersites im Verbund der europäischen Forschungsinfrastruktur ACTRIS (Aerosol, Cloud and Trace gas Research Infrastructure) angewendet.

Literaturverzeichnis

Übersichts-Veröffentlichung:

Macke, A., Seifert, P., Baars, H., Beekmans, C., Behrendt, A., Bohn, B., Bühl, J., Crewell, S., Damian, T., Deneke, H., Düsing, S., Foth, A., Di Girolamo, P., Hammann, E., Heinze, R., Hirsikko, A., Kalisch, J., Kalthoff, N., Kinne, S., Kohler, M., Löhnert, U., Madhavan, B. L., Maurer, V., Muppa, S. K., Schween, J., Serikov, I., Siebert, H., Simmer, C., Späth, F., Steinke, S., Träumner, K., Wehner, B., Wieser, A., Wulfmeyer, V., and Xie, X.: The HD(CP)² Observational Prototype Experiment HOPE – An Overview,

Stand HOPE Special Issue ACP (chronologisch):

08 Mar 2017

[Multiresolution analysis of the spatiotemporal variability in global radiation observed by a dense network of 99 pyranometers](#)

Bomidi Lakshmi Madhavan, Hartwig Deneke, Jonas Witthuhn, and Andreas Macke
Atmos. Chem. Phys., 17, 3317-3338, doi:10.5194/acp-17-3317-2017, 2017

16 Feb 2017

[A Parameterization of Heterogeneous Hydrolysis of N₂O₅ for 3-D Atmospheric Modelling: Improvement of Particulate Nitrate Prediction](#)

Ying Chen, Ralf Wolke, Liang Ran, Wolfram Birmili, Gerald Spindler, Wolfram Schröder, Hang Su, Yafang Cheng, Ina Tegen, and Alfred Wiedensohler

Atmos. Chem. Phys. Discuss., doi:10.5194/acp-2017-105, 2017

Manuscript under review for ACP (discussion: open, 0 comments)

10 Feb 2017

[Target categorization of aerosol and clouds by continuous multiwavelength-polarization lidar measurements](#)

Holger Baars, Patric Seifert, Ronny Engelmann, and Ulla Wandinger

Atmos. Meas. Tech. Discuss., doi:10.5194/amt-2016-410, 2017

Manuscript under review for AMT (discussion: open, 2 comments)

17 Jan 2017

[Characterisation of boundary layer turbulent processes by the Raman lidar BASIL in the frame of HD\(CP\)² Observational Prototype Experiment](#)

Paolo Di Girolamo, Marco Cacciani, Donato Summa, Andrea Scoccione, Benedetto De Rosa, Andreas Behrendt, and Volker Wulfmeyer

Atmos. Chem. Phys., 17, 745-767, doi:10.5194/acp-17-745-2017, 2017

21 Nov 2016

[The HD\(CP\)² Observational Prototype Experiment HOPE – An Overview](#)

Andreas Macke, Patric Seifert, Holger Baars, Christoph Beekmans, Andreas Behrendt, Birger Bohn, Johannes Bühl, Susanne Crewell, Thomas Damian, Hartwig Deneke, Sebastian Düsing, Andreas Foth, Paolo Di Girolamo, Eva Hammann, Rieke Heinze, Anne Hirsikko, John Kalisch, Norbert Kalthoff, Stefan Kinne, Martin Kohler, Ulrich Löhnert, Bomidi Lakshmi Madhavan, Vera Maurer, Shravan Kumar Muppa, Jan Schween, Ilya Serikov, Holger Siebert, Clemens Simmer, Florian Späth, Sandra Steinke, Katja Träumner, Birgit Wehner, Andreas Wieser, Volker Wulfmeyer, and Xinxin Xie

Atmos. Chem. Phys. Discuss., doi:10.5194/acp-2016-990, 2016

Revised manuscript accepted for ACP (discussion: closed, 6 comments)

16 Nov 2016

[Cloud photogrammetry with dense stereo for fisheye cameras](#)

Christoph Beekmans, Johannes Schneider, Thomas Läbe, Martin Lennerfer, Cyrill Stachniss, and Clemens Simmer

Atmos. Chem. Phys., 16, 14231-14248, doi:10.5194/acp-16-14231-2016, 2016

27 Sep 2016

[Parameterizing cloud condensation nuclei concentrations during HOPE](#)

Luke B. Hande, Christa Engler, Corinna Hoose, and Ina Tegen

Atmos. Chem. Phys., 16, 12059-12079, doi:10.5194/acp-16-12059-2016, 2016

14 Jun 2016

[Evaluation of large-eddy simulations forced with mesoscale model output for a multi-week period during a measurement campaign](#)

Rieke Heinze, Christopher Moseley, Lennart Nils Böske, Shravan Muppa, Vera Maurer, Siegfried Raasch, and Bjorn Stevens

Atmos. Chem. Phys. Discuss., doi:10.5194/acp-2016-498, 2016

Manuscript under review for ACP (discussion: final response, 2 comments)

10 Jun 2016

[Precipitation and microphysical processes observed by three polarimetric X-band radars and ground-based instrumentation during HOPE](#)

Xinxin Xie, Raquel Evaristo, Clemens Simmer, Jan Handwerker, and Silke Trömel

Atmos. Chem. Phys., 16, 7105-7116, doi:10.5194/acp-16-7105-2016, 2016

25 May 2016

[Local short-term variability in solar irradiance](#)

Gerald M. Lohmann, Adam H. Monahan, and Detlev Heinemann

Atmos. Chem. Phys., 16, 6365-6379, doi:10.5194/acp-16-6365-2016, 2016

15 Mar 2016

[Evaluating the spatio-temporal performance of sky-imager-based solar irradiance analysis and forecasts](#)

Thomas Schmidt, John Kalisch, Elke Lorenz, and Detlev Heinemann

Atmos. Chem. Phys., 16, 3399-3412, doi:10.5194/acp-16-3399-2016, 2016

08 Feb 2016

[Observed spatiotemporal variability of boundary-layer turbulence over flat, heterogeneous terrain](#)

V. Maurer, N. Kalthoff, A. Wieser, M. Kohler, M. Mauder, and L. Gantner

Atmos. Chem. Phys., 16, 1377-1400, doi:10.5194/acp-16-1377-2016, 2016

09 Nov 2015

[Spatial and temporal variability of clouds and precipitation over Germany: multiscale simulations across the "gray zone"](#)

C. Barthlott and C. Hoose

Atmos. Chem. Phys., 15, 12361-12384, doi:10.5194/acp-15-12361-2015, 2015

16 Jul 2015

[Water vapour profiles from Raman lidar automatically calibrated by microwave radiometer data during HOPE](#)

A. Foth, H. Baars, P. Di Girolamo, and B. Pospichal

Atmos. Chem. Phys., 15, 7753-7763, doi:10.5194/acp-15-7753-2015, 2015

20 May 2015

[Profiles of second- to fourth-order moments of turbulent temperature fluctuations in the convective boundary layer: first measurements with rotational Raman lidar](#)

A. Behrendt, V. Wulfmeyer, E. Hammann, S. K. Muppa, and S. Pal

Atmos. Chem. Phys., 15, 5485-5500, doi:10.5194/acp-15-5485-2015, 2015

12 Mar 2015

[Temperature profiling of the atmospheric boundary layer with rotational Raman lidar during the HD\(CP\)² Observational Prototype Experiment](#)

E. Hammann, A. Behrendt, F. Le Mounier, and V. Wulfmeyer

Atmos. Chem. Phys., 15, 2867-2881, doi:10.5194/acp-15-2867-2015, 2015

09 Mar 2015

[Assessment of small-scale integrated water vapour variability during HOPE](#)

S. Steinke, S. Eikenberg, U. Löhnert, G. Dick, D. Klocke, P. Di Girolamo, and S. Crewell

Atmos. Chem. Phys., 15, 2675-2692, doi:10.5194/acp-15-2675-2015, 2015

21 Nov 2014

[High-resolution atmospheric water vapor measurements with a scanning differential absorption lidar](#)

F. Späth, A. Behrendt, S. K. Muppa, S. Metzendorf, A. Riede, and V. Wulfmeyer

Atmos. Chem. Phys. Discuss., 14, 29057-29099, doi:10.5194/acpd-14-29057-2014, 2014

Revised manuscript has not been submitted (discussion: closed, 5 comments)

in diesem Bericht zitiert:

- Behrendt, A., V. Wulfmeyer, E. Hammann, S. K. Muppa, and S. Pal, 2015a: Profiles of second- to fourth-order moments of turbulent temperature fluctuations in the convective boundary layer: first measurements with rotational Raman lidar. *Atmos. Chem. Phys.* **15**, 5485-5500. DOI:10.5194/acp-15-5485-2015.
- Hammann, E., A. Behrendt, F. Le Mounier, and V. Wulfmeyer, 2015: Temperature profiling of the atmospheric boundary layer with rotational Raman lidar during the HD(CP)2 Observational Prototype Experiment. *Atmos. Chem. Phys.* **15**, 2867-2881.
- Kalthoff N, Adler B, Wieser A, Kohler M, Träumner K, Handwerker J, Corsmeier U, Khodayar S, Lambert D, Kopmann A, Kunka N, Dick G, Ramatschi M, Wickert J, Kottmeier C. 2013a. Kitcube– a mobile observation platform for convection studies deployed during hymex. *Meteorol. Z.* **22**: 633–647, doi:10.1127/0941-2948/2013/0542.
- Löhnert, U., S. Crewell, O. Krasnov, E. O'Connor, and H. Russchenberg, 2008: Advances in continuously profiling the thermodynamic state of the boundary layer: integration of measurements and methods. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **25**, 1251–1266.
- Macke, A., Seifert, P., Baars, H., Beekmans, C., Behrendt, A., Bohn, B., Bühl, J., Crewell, S., Damian, T., Deneke, H., Düsing, S., Foth, A., Di Girolamo, P., Hammann, E., Heinze, R., Hirsikko, A., Kalisch, J., Kalthoff, N., Kinne, S., Kohler, M., Löhnert, U., Madhavan, B. L., Maurer, V., Muppa, S. K., Schween, J., Serikov, I., Siebert, H., Simmer, C., Späth, F., Steinke, S., Träumner, K., Wehner, B., Wieser, A., Wulfmeyer, V., and Xie, X.: The HD(CP)2 Observational Prototype Experiment HOPE – An Overview, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2016-990, Accepted, 2017.
- Madhavan, B. L., J. Kalisch, and A. Macke (2016), Shortwave surface radiation network for observing small-scale cloud inhomogeneity fields, *Atmospheric Measurement Techniques*, **9**(3), 1153–1166, doi:10.5194/amt-9-1153-2016.
- Marke, T., K. Ebell, U. Löhnert, D.D. Turner: Statistical retrieval of thin liquid cloud microphysical properties using ground-based infrared and microwave observations, submitted to *Journal of Geophysical Research*, July 2016
- Muppa, S. K., Behrendt, A., Späth, F., Wulfmeyer, V., Metzendorf, S., and Riede, A.: Turbulent humidity fluctuations in the convective boundary layer, 2016: Case studies using DIAL measurements, *Bound.-Lay. Meteorol.*, **158**, 43–66, doi:10.1007/s10546-20-015-0078-9.

Päschke E., V. Lehmann and R. Leinweber: An assessment of the performance of a 1.5 μm Doppler lidar for operational vertical wind profiling based on a 1-year trial, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 2251-2266, 2015

Rodgers, C., 2000: Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice, World Scientific, 238 pp.

Schween, J. H., A. Hirsikko, U. Löhnert, and S. Crewell, 2014: Mixing layer height retrieval with ceilometer and Doppler lidar: from case studies to long-term assessment, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 3685-3704, [doi:10.5194/amt-7-3685-2014](https://doi.org/10.5194/amt-7-3685-2014).

Späth, F., A. Behrendt, S. K. Muppa, S. Metzendorf, A. Riede, and V. Wulfmeyer, 2016: 3D water vapor field in the atmospheric boundary layer observed with scanning differential absorption lidar. *Atmos. Meas.*
DOI:10.5194/amt-9-1701-2016.

Wulfmeyer, V., Muppa, S.K., Behrendt, A., Hammann, E., Späth, F., Sorbjan, Z., Turner, D.D., and Hardesty, R.M., 2016: Determination of Convective Boundary Layer Entrainment Fluxes, Dissipation Rates, and the Molecular 25 Destruction of Variances: Theoretical Description and a Strategy for its Confirmation with a Novel Lidar System Synergy. *J. Atmos. Sci.*, doi:10.1175/JAS-D-14-0392.1.