

# High Definition Clouds and Precipitation for Climate Prediction (HD(CP)<sup>2</sup>)

## Abschlussbericht

### HD(CP)<sup>2</sup> - Verbundprojekt S1 – Diagnostik

#### Förderkennzeichen

01LK1213A, 01LK1213B, 01LK1213C, 01LK1213D

#### Zuwendungsempfänger

Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, neue Kurzform: Zuse Institut Berlin (ZIB), 14195 Berlin

Universität Leipzig, 04109 Leipzig

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 51170 Köln

Universität zu Köln, 50923 Köln

#### Ausführende Stellen

Zuse Institut Berlin (ZIB), Visual Data Analysis Department, Takustraße 7, 14195 Berlin

Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften, Leipziger Institut für Meteorologie, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre, Münchener Straße 20, 82234 Weßling

Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie, Albertus-Magnus-Platz, 50923 Köln

#### Projektverantwortliche

##### **Teilprojekt 1; Arbeitspaket S1.3.3**

Prof. Hans-Christian Hege, Zuse Institut Berlin

Prof. Dr. Rupert Klein, Freie Universität Berlin

Prof. Dr. Peter Spichtinger, Johannes Gutenberg-Universität Mainz

##### **Teilprojekt 2; Arbeitspaket S1.3.2**

Prof. Dr. Johannes Quaas, Universität Leipzig

##### **Teilprojekt 3; Arbeitspakete S1.3.1 und S1.3.5**

Dr. Patrick Jöckel und Prof. Dr. Robert Sausen, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

##### **Teilprojekt 4; Arbeitspaket S1.3.4**

Prof. Dr. Yaping Shao, Universität zu Köln

#### Projektlaufzeit

1. Oktober 2012 – 30. September 2015, verlängert bis 31. März 2016

# I. Kurzdarstellung

## 1. Aufgabenstellung

Die Aufgabe des Teilprojektes „S1 – HD(CP)<sup>2</sup> Diagnostiken“ war die Verknüpfung der Arbeiten in der Modellentwicklung und den Beobachtungen. Dazu sollten eine einheitliche Datenstruktur und Schnittstelle entwickelt werden, die die Anwendung von komplexen Diagnostiken online, d.h. während der Ausführung der Modellsimulation, ermöglicht. Ziel dieser Diagnostiken ist unter anderem der Vergleich zu Mess- und Modelldaten und damit den konkreten Nutzen großskaliger, wolkenauflösender Simulationssysteme bei der Verbesserung zukünftiger meteorologischer Modelle zu belegen.

Insbesondere sollten Diagnostiken zur Verfügung gestellt werden, die die Verfolgung zeitabhängiger deterministischer und stochastische Phänomene, die Berechnung von Trajektorien, die Analyse von Turbulenzeigenschaften und Analyse von Wahrscheinlichkeitsdichten (PDFs, Probability Density Functions) ermöglichen. Verschiedene Diagnostikwerkzeuge sollten dabei gleichzeitig und auch in Kombination während der Simulation anwendbar sein. Dies sollte neue Möglichkeiten der Analyse von Modellsimulationen ermöglichen, um so zum Beispiel die Entwicklung von PDFs über den Lebenszyklus eines Objektes zu verfolgen.

Die Anwendung von Diagnostiken zur Laufzeit des Modells soll dabei den Weg für zukünftige neuartige Anwendungen eröffnen, und dabei die Lücke zwischen Simulation und klassischem Post-Processing schließen. Eine Kombination verschiedener Diagnostiken in einem umfangreichen Modellsystem wird dabei als wichtiges Werkzeug für zukünftige Verbesserungen von Parametrisierungen in Klimamodellen angesehen.

Aufgabe des Arbeitspakets **S1.3.1 „Diagnostische Infrastruktur“** war der Entwurf, die Entwicklung und Implementierung einer einheitlichen Schnittstelle in ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic modelling framework; Zängl et al., 2015). Diese sollte eine Daten- und Infrastruktur zur standardisierten Implementierung verschiedener Online-Diagnostikwerkzeuge bereitstellen. Als Meilenstein zum Abschluss des zweiten Projektjahres sollte ein Prototyp, der die Diagnostikschnittstelle verwendet, entwickelt werden.

In Arbeitspaket **S1.3.2 „Multiskalige Diagnostiken von verbundenen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen“** war das konkrete Ziel die Ableitung und Implementierung von Diagnostiken der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen (joint-PDFs), die relevant für die Wolkenparametrisierung, Evaluierung und Entwicklung sind.

Die Aufgabe des Arbeitspakets **S1.3.3 „Extraktion und Tracking von Features“** war die Entwicklung eines Systems zur Extraktion und zum Verfolgen („Tracking“) von Merkmalen („Features“) aus bzw. in Daten aus HD(CP)<sup>2</sup>-Teilprojekten. Die erste Aufgabe war die Auswahl einer geeigneten Methodik zur Extraktion von Merkmalen (Objekten oder Features) in den entsprechenden Datenmodalitäten (d.h. Simulationsdaten, Messdaten). Darauf aufbauend sollten geeignete Algorithmen zur Charakterisierung von Wolken und Niederschlagsobjekten auf Basis von Mess- und Simulationsdaten entwickelt werden. Ziel dieser Entwicklung waren Analysewerkzeuge zur objektbasierten Evaluation, für den objektbasierten Vergleich und die Integration und Kombination mit vorhandenen Diagnostikverfahren. Teil dieser Aufgabe war dabei die Entwicklung von Verfahren die sowohl zur generischen Analyse (d.h. möglichst annahmefrei und modellunabhängig), als auch zur Onlineanalyse des ICON-Modells eingesetzt werden können. Zudem zielte die Aufgabenstellung auf die Einbindung von Trajektorien zur Ermittlung struktureller Merkmale (z.B. Interaktion mit Strömungsfeldern, Transportprozesse) von Wolkenbildungs- und Niederschlagsprozessen ab.

Traditionelle Wetter- und Klimamodelle basieren auf der fundamentalen Annahme, dass atmosphärische Bewegungen in eine mittlere und eine turbulente Komponente aufgeteilt werden können. Oder, von der numerischen Perspektive aus betrachtet, können sie in eine gitterskalige und eine subskalige Komponente mit Hilfe von Reynolds-Mittelung oder –Filterung separiert werden. Die

theoretische Rechtfertigung für diesen Ansatz liegt in der Existenz einer mesoskaligen Lücke im Energiespektrum (Fiedler und Panofsky, 1970). Groß- und kleinskalige Bewegungen werden durch unterschiedliche Energiequellen angetrieben (Frisch, 1995).

Für zukünftige numerische Wettermodelle, basierend auf unstrukturiertem adaptivem Gitter, wie es bei ICON der Fall ist, wird die oben genannte Annahme der Energielücke weniger kritisch. Jedoch bleibt der Bedarf der numerischen Trennung von gitterskaligen und subskaligen Komponenten bestehen, obwohl die Komponenten unterschiedliche physikalische Skalen in unterschiedlichen Umständen repräsentieren könnten. Turbulente subskalige Schließungen bleiben daher ein sehr wichtiger Anteil an zukünftigen Wetter- und Klimamodellen. Es ist offensichtlich, dass die multi-skalige Modellkapazität des ICON Modells hohe Anforderungen an die Skalenkonsistenz der subskaligen Schließungen und der Parametrisierung von turbulenten Flüssen stellt.

Die Aufgabenstellungen in Arbeitspaket **S1.3.4 „Multiskalen Turbulenzdiagnostik“** war die Durchführung einer diagnostischen Studie für turbulente Diagnostik des ICON Modells mit Fokus auf die atmosphärische Grenzschichtstruktur und turbulenten Transport. Es sollte zur Entwicklung eines Diagnosepakets beigetragen werden, um die Modellentwicklung zu unterstützen. Dazu sollte ein Set von turbulenten diagnostischen Variablen definiert werden, welches Zustandsvariablen (z.B. Wind, potentielle Temperatur und spezifische Feuchte), Flüsse (z.B. Impuls, fühlbare und latente Wärme) und Varianzen (z.B. turbulente kinetische Energie) beinhaltet. Die Charakteristiken der Turbulenz innerhalb der Modellsimulation können dann mittels des Diagnosepakets bestimmt werden.

Die Skalenkonsistenz der in ICON implementierten Turbulenzschließung sollte mittels der Technik der Wavelet-Analyse überprüft werden. Die simulierten physikalischen Größen (z.B. Wind und potentielle Temperatur) werden dabei in ihre Wavelet-Komponenten zerteilt und repräsentieren dabei unterschiedliche Skalen. Mittels der Korrelation zwischen den unterschiedlichen Wavelet-Komponenten der Zustandsvariablen können die Komponenten der Flüsse (z.B. des fühlbaren Wärmeflusses) abgeschätzt werden.

Des Weiteren war geplant, zu untersuchen bis zu welchem Grad ICON die Struktur der Oberflächenflüsse über heterogenen Landoberflächen und die Temperatur- und Feuchteprofile in den dazugehörigen atmosphärischen Grenzschichten simulieren kann.

In Arbeitspaket **S1.3.5 „Online Trajektorien“** sollte ein Werkzeug zur Berechnung von Trajektorien während der Modelllaufzeit entwickelt werden.

## **2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

**S1.3.1 und S1.3.5:** Die Abteilung „Erdsystemmodellierung“ (früher „Dynamik der Atmosphäre“) am Institut für Physik der Atmosphäre (DLR) verfügt über breites Wissen zur Anwendung von Erdsystemmodellen und der Kopplung von verschiedenen Komponenten an diese Modelle. In den letzten Jahren wurden von den Wissenschaftlern das „Modular Earth Submodel System“ (MESSy) angewendet und weiterentwickelt (Jöckel et al., 2010, 2016).

Im Bereich der Lagrangeschen Analyse wurde ATTILA (Atmospheric Tracer Transport In a Lagrangian model; Reithmeier und Sausen, 2002) entwickelt. Dieses Modell wird im Rahmen der Entwicklung des Erdsystemmodells EMAC (ECHAM5/MESSy Atmospheric Chemistry; Jöckel et al., 2010, 2016) als Submodell weiterentwickelt.

**S1.3.2:** Die Arbeitsgruppe „Wolken und globales Klima“ an der Universität Leipzig war hervorragend für die Arbeiten in dem Projekt qualifiziert. Auf der einen Seite wurden im Vorfeld des Projektes zahlreiche Studien durchgeführt und publiziert, in denen die relevanten Größen der Wolkenparametrisierungen in Klimamodellen untersucht und mit Beobachtungsdaten evaluiert wurden (z.B. Weber et al., 2011; Quaas, 2012; Schemann et al., 2013). Zum anderen hat die Arbeitsgruppe als eine der ersten in Deutschland die neuen Satellitensimulatoren genutzt, die die Klimamodellergebnisse direkt mit Satellitenbeobachtungen vergleichbar machen (Quaas et al., 2004; Ringer et al., 2006; Gehlot und Quaas, 2012, Nam und Quaas, 2012; Nam et al., 2014).

**S1.3.3:** Das Vorhaben wurde innerhalb der Abteilung Visualisierung und Datenanalyse (Visual Data Analysis) am Zuse Institut Berlin (ZIB) durchgeführt. Durch seine Vorarbeiten verfügt die Abteilung über leistungsfähige Verfahren zur visuell gestützten Analyse raumzeitlicher Daten sowie über umfangreiche Erfahrungen in der Algorithmenentwicklung, dem Systementwurf und im High-Performance Computing (HPC).

Bezüglich Arbeitsumgebung und technischer Infrastruktur bietet das ZIB eine zeitgemäße technische Ausstattung, eine interdisziplinäre Forschungsumgebung, eine enge Anbindung an die HPC-Infrastruktur (zur Speicherung und Verarbeitung besonders großer Datenmengen) und Kontakt zu ähnlichen Forschungsprojekten (im Rahmen des HLRN<sup>1</sup>-Verbundes).

Ein besonderer Schwerpunkt der Arbeitsgruppe Visual Data Analysis liegt auf annahmefreien, topologie- und geometriebasierten Methoden zur Analyse (zeitabhängiger) Skalar-, Vektor- und Tensorfelder. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Analyse von Ensemble-Daten und Quantifizierung von Unsicherheiten in raumzeitlichen Daten, wie etwa Klimadaten (Pöthkow und Hege, 2011).

Neu entwickelte Datenanalyse- und Visualisierungsmethoden werden in dem im Institut entwickelten Framework Amira (Avizo; Stalling et al., 2005) implementiert. Es handelt sich um ein plattformunabhängiges, modularisiertes und multidisziplinär einsetzbares System zur visuell gestützten Datenanalyse. Das Framework ermöglicht es, neu entwickelte Verfahren in Kombination mit früher entwickelten einzusetzen und somit auch komplexe Analyseaufgaben zu bewältigen. Weiterhin wird durch die Verfügbarkeit der Methoden in diesem Framework der Transfer in die Anwendungsgebiete erleichtert. Interessierte Kooperationspartner des ZIB erhalten auch kostenfreie Lizenzen. Unter anderem befindet sich Amira am DKRZ im praktischen Einsatz, was einen direkten Transfer der im Projekt entwickelten Methoden in den meteorologischen Anwendungsbereich erlaubt.

**S1.3.4:** Für die beabsichtigten Arbeiten am „Institut für Geophysik und Meteorologie“ der Universität zu Köln wurde eine Förderung für eine Doktorandenstelle (65% E13 für 36 Monate; davon 8 Monate kostenneutrale Verlängerung aufgrund verspäteten Beginns + 6 Monate kostenneutrale Verlängerung) genehmigt. Aufgrund der limitierten Förderung entschieden wir uns dazu den Umfang der Arbeit auf die Entwicklung und Anwendung des Diagnosepakets für Turbulenz und die Überprüfung der Skalenkonsistenz der in ICON implementierten Turbulenzschließung mittels der Technik der Wavelet-Analyse zu fokussieren.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

**S1.3.1 und S1.3.5:** Die Durchführung des Projektes war in sechs Abschnitte gegliedert. Nach der Zusammenstellung eines Anforderungsprofils für verschiedene Diagnostiken (S1.3.1.2) wurde ein Konzept zur Datenstruktur und der Infrastruktur erstellt (S1.3.1.3). Dabei wurde auf das „Modular Earth Submodel System“ (MESSy) zurückgegriffen, das die Anforderungen zur Daten- und Infrastruktur weitgehend erfüllte. Diverse Erweiterungen, insbesondere bezüglich der Gitterstruktur und der Option des Nestings verschiedener Gitter in ICON, wurden in MESSy vorgenommen (Kern und Jöckel, 2016). Während der Implementierung der Daten- und Infrastruktur (S1.3.1.4) wurde ein Prototyp einer komplexen Diagnostik zur Aggregation von Daten auf nutzerdefinierten Gittern und zur Berechnung von joint-PDFs in Zusammenarbeit mit Teilprojekt 2 entwickelt (S1.3.1.5). Damit wurde der Meilenstein für das Ende des zweiten Projektjahres erreicht. Es erfolgte eine Optimierung der Prototypimplementierung (S1.3.1.6) und eine Erweiterung der Diagnostiken um weitere Werkzeuge (S1.3.1.7). Im Arbeitspaket 5 (S1.3.5) wurde ein Prototyp eines Online-Trajektorienwerkzeugs entwickelt (Kern et al., in Vorbereitung). Es wurde weiterhin im Projekt O3 ein Modul zur Berechnung von Satellitenbildern entwickelt, das die Diagnostikschnittstelle nutzt (Scheck et al., 2015). Während der ganzen Projektzeit erfolgte eine Abstimmung mit der Modellentwicklung in Modul M1 (S1.3.1.1).

---

<sup>1</sup> Norddeutscher Verbund für Hoch- und Höchstleistungsrechnen (HLRN): <https://www.hlrn.de/>

Mit der Projektdurchführung wurde erst nach der Besetzung der Stellen ab 01.02.2013 begonnen. Die halbe Stelle wurde erst zum 15.08.2013 besetzt. Dadurch haben sich die Arbeiten um ca. fünf Monate verschoben. Durch die Verlängerung der Projektlaufzeit auf 31.03.2016 konnten die geplanten Arbeiten trotz des verspäteten Beginns abgeschlossen und die Prototypen fertiggestellt werden.

Im Laufe des Projekts wurde ein Kick-Off Treffen des S1 Projekts am 19.09.2013 in München durchgeführt. Ein ICON-MESSy Workshop mit insgesamt 10 Teilnehmern aus dem S Projekt fand vom 20. Bis 22. August 2014 in Oberpfaffenhofen statt.

**S1.3.2:** Die Projektdurchführung war in vier Abschnitte gegliedert, nämlich die vorläufige Definition der kombinierten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (joint-PDF; S1.3.2.1) und ihre vorläufige Implementierung (S1.3.2.2), die Definition der zusätzlich nötigen Diagnostiken (S1.3.2.3) und schließlich die endgültige Implementierung (S1.3.2.4). Diese Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit Partnern und Projekten in HD(CP)<sup>2</sup> durchgeführt. Die Definition der joint-PDF erfolgte in Abstimmung mit den Projekten HD(CP)<sup>2</sup>-S2 – Stochastics und HD(CP)<sup>2</sup>-S3 – Ice Clouds. Die Definition der zusätzlichen Diagnostiken gemeinsam mit Projekt HD(CP)<sup>2</sup>-S5 – Uncertainty. Schließlich wurde die Implementierung in intensiver Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten aus HD(CP)<sup>2</sup>-S1 – Diagnostics durchgeführt, insbesondere mit dem Teilprojekt 3. Die Projektlaufzeit wurde um 6 Monate verlängert. Die Arbeiten dieser Periode sollten der Evaluierung der dann vorhandenen ersten Simulationen mit dem hochaufgelösten HD(CP)<sup>2</sup>-Modell dienen.

**S1.3.3:** Die Durchführung des Projektes war in vier Abschnitte gegliedert.

Der erste Abschnitt behandelte den Entwurf und die Implementierung von generischen Algorithmen zur objektbasierten Analyse meteorologischer Daten. Inhaltliche Schwerpunkte waren dabei die genauere, formale Umschreibung der zu erfassenden Zielobjekte (Definition von Features) sowie die Entwicklung algorithmischer Konzepte für deren Extraktion und zeitliche Verfolgung (Tracking). Zudem umfasste dieser Projektabschnitt den Entwurf und die Realisierung verschiedener Extraktions- und Trackingverfahren, als auch die Auswahl geeigneter Verfahren im Hinblick auf die geplanten Offline- und Online-Analysen. Es wurde eine Liste der zu erwartenden Features erstellt<sup>2</sup>, drei verschiedene Trackingverfahren implementiert und eine Infrastruktur zur Auswertung von umfangreichen Trackingdaten aufgebaut.

Der zweite Projektabschnitt beinhaltete die anwendungsorientierte Extraktion und das Tracking der beschriebenen Features mit Hilfe der neu entwickelten Verfahren in Daten, die bis dahin im HD(CP)<sup>2</sup>-Projekt verfügbar waren. Desweiteren umfasste dieses Arbeitspaket die Weiterentwicklung der gewählten Ansätze, eine Präzisierung der o.g. Featurekonzepte im Hinblick auf die Anwendungsszenarien, als auch die Entwicklung geeigneter Auswertungskonzepte. In Zusammenarbeit mit den Modulen M6 und S4, S7 wurden die Verfahren auf relevante Daten und Szenarien angewendet und weiterentwickelt (Engelke et al., 2014; Kuhn et al., 2015).

Im dritten Projektabschnitt stand die Anwendung (d.h. Extraktion, Tracking, Auswertung) der entwickelten Techniken auf die in HD(CP)<sup>2</sup> entstandenen hochaufgelösten Daten im Vordergrund. Geplant war eine Anwendung der Techniken im On- und Offline-Betrieb, die Entwicklung einer Auswertungsinfrastruktur, sowie Nutzung der gewonnenen Ergebnisse zur Evaluation des entwickelten ICON-Modells. Dieses Ziel wurde auch erreicht, allerdings erfolgten alle Analysen offline – aus zwei Gründen: Einerseits rückte das Thema Vergleichbarkeit von gewonnenen Informationen mit solchen aus anderen Simulationsmodellen, wie auch aus Messdaten in den Vordergrund. Andererseits war die vorgesehene objektbasierte (nicht-lokale) Analyse mit Hilfe der bis dahin vorhandenen online Diagnostik-Schnittstelle nicht im Rahmen des vorgesehenen Ressourcenbudgets (insbes. bezüglich des knotenübergreifenden Kommunikationsaufwandes zur Programmlaufzeit) umsetzbar.

---

<sup>2</sup> Einzusehen unter: <http://goo.gl/rqjhxq>

Mit Hilfe der entstandenen Verfahren wurden umfassende objektbasierte Analysen der vorliegenden Daten durchgeführt, die entwickelten Methoden evaluiert und eine Infrastruktur zur weitgehend automatisierten Auswertung von Trackingdaten entwickelt (Kuhn und Trömel, 2015). In Kooperation mit O2 und S7 wurde ein Workshop zur praktischen Anwendung der entwickelten Verfahren durchgeführt.

Im vierten Projektabschnitt stand die Weiterentwicklung und Anwendung der gewonnenen Methoden im Vordergrund. Dabei ging es einerseits um die Implementierung und Anwendung skalenunabhängiger, annahmefreier Methoden und um deren Anwendung auf das entstandene ICON-Modell als Ergänzung zu herkömmlichen diagnostischen Verfahren. Andererseits wurden zur Weiterentwicklung und zur Validierung des ICON-Modells Simulations- und Messdaten merkmalsbasiert verglichen.

Es wurde gezeigt, dass die entwickelten merkmalsbasierten Konzepte und Verfahren robust auf den Zielmodalitäten (u.a. Radardaten O2, COSMO-DE, ICON) arbeiten und dass sie bei der Evaluation des Modells von praktischem Nutzen sind (Heinze et al., 2016). Zudem wurde deren Anwendbarkeit bei der Analyse von Multiskalendaten (Kuhn et al., 2015a) und für Daten mit unterschiedlicher Gitterstruktur in variablen räumlichen und zeitlichen Auflösungen nachgewiesen (z.B. Kombination von Trajektorien mit Satellitenmessungen und weiteren Simulationsausgaben) (Kuhn et al., 2015; Günther et al., 2016). Darüber hinaus wurden neue Konzepte zur Visualisierung und Analyse trajektorienbasierter und zeitabhängiger Features entwickelt (Kuhn et al., 2013, 2014). Die entstandenen Arbeiten wurden in nationalen und internationalen Konferenzen und Fachjournalen vorgetragen und publiziert.

**S1.3.4:** Der ursprüngliche Zeitplan war:

Projektmonat	Aufgabe
6	Definition von diagnostischen Variablen und Benchmark-Testfällen
12	Entwicklung des turbulenten Diagnosepakets für atm. Grenzschichtprofile und Energiespektren
18	Entwicklung der Wavelet-Analyse Methode
24	Wavelet-Analyse der Skalenkonsistenz der Turbulenzschließung von ICON
30	LES-ALM Model Simulationen für den Standort Selhausen und Bereitstellung der Daten für den Modellvergleich
36	Diagnostische Analyse der Güte der turbulenten Flüsse in ICON über heterogenen Landoberflächen

#### 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

**S1.3.1 und S1.3.5:** Mit dem „Modular Earth Submodel System“ (MESSy; Jöckel et al., 2010) bestand zu Projektbeginn bereits eine Möglichkeit verschiedene Komponenten an ein Erdsystemmodell anzukoppeln. Nach der Überprüfung der vorhandenen Implementierung bezüglich ihrer Eignung zur Verwendung als Interface für Diagnostikwerkzeuge, wurde eine Erweiterung des MESSy Interfaces hinsichtlich der Anforderungen des ICON Modells beschlossen. Die Entwicklung des Prototyps eines Trajektorienwerkzeugs in Teilprojekt S1.3.5 erfolgte in Form eines Diagnostikwerkzeugs, welches die Schnittstellen- und Datenstrukturen des Diagnostikinterfaces verwendet.

**S1.3.2:** Basis der Definition der joint-PDF und ihrer Ausgangsgrößen waren die verschiedenen Wolkenparametrisierungen für Klimamodelle. Diese reichen von sehr einfachen Formulierungen (z.B. Sundqvist et al., 1989) bis hin zu sehr komplexen Formulierungen (z.B. Larson et al., 2002). In den

komplexesten Formulierungen ist die Ko-Variabilität von Spezifischer Feuchte (bzw. Gesamtwasser-Spezifischer Feuchte als unter Phasenumwandlungen erhaltener Größe), Temperatur (wobei häufig in Modellen Potentielle Temperaturen benutzt werden, aus denen sich dann allerdings nicht ohne Kenntnis von Druck die Sättigungsfeuchte ableiten lässt) und Vertikalwind notwendig, um die Bildung und Eigenschaften von Wolken zu diagnostizieren.

**S1.3.3:** Mit Beginn des Projektes stand am ZIB die Visualisierungs- und Datenanalysesoftware Amira/Avizo zur Verfügung. Amira bietet als modulbasierte Plattform mit zahlreichen Datenschnittstellen die Möglichkeit, die neuen Funktionen zu integrieren, mit existierenden Algorithmen zu kombinieren und Daten interaktiv auszuwerten. In Amira standen zudem grundlegende Verarbeitungsmöglichkeiten (z.B. Filteroperatoren, Typkonvertierung, Gitterabtastung) als auch Postprocessing-Verfahren zur Verfügung (z.B. Segmentierung, Korrelationsanalyse, Topologie-Extraktion), die im Rahmen des Projektes, den speziellen Anforderungen folgend, erweitert wurden.

**S1.3.4:** Einhergehend mit der immer weiter steigenden Kapazität der Supercomputer, wurde viel investiert um global mit sehr hohen Auflösungen zu simulieren und somit Modellunsicherheiten zu reduzieren, indem Skalen explizit aufgelöst werden, die vorher parametrisiert werden mussten. Zängl et al. (2015) beschreiben, dass zum Ende dieser Dekade globale operationelle numerische Wettervorhersagemodelle (NWP) bis hin zu solchen Auflösungen reichen, für die ein nicht-hydrostatischer dynamischer Kern unerlässlich wird. Als Konsequenz daraus haben oder werden viele wissenschaftliche Institutionen und Wettervorhersage-Zentren nicht-hydrostatische globale atmosphärische Modelle entwickeln. Ein anderes Ergebnis dieser Entwicklung ist, dass zukünftige Hochleistungsberechnungen an massive parallele Algorithmen gebunden sind und auf  $10^4$  bis  $10^6$  Kernen arbeiten müssen (Zängl et al., 2015). Das verdrängt spektrale Transform-Modelle und reguläre Länge-Breite Gitter, da diese aufgrund des Bedarfs an extensiver globaler Kommunikation Limitierungen der Skalierung enthalten. Dies und noch weitere Gründe, siehe Zängl et al. (2015) für mehr Details, führen zu mehr und mehr globalen nicht-hydrostatischen Modellen, die auf Ikosaeder-Gittern basieren oder andere vergleichbare, wie die kubisch-sphärischen Gitter.

Während der Trend zu vereint entwickelten Modellen übergeht, welche die Rechenressourcen effizient nutzen und die immer weiter ansteigenden technischen Komplexitäten der Software Infrastruktur, wie I/O und Parallelisierung, handhabbar machen, bleibt immer noch der limitierte Computerspeicher und die limitierte Leistungsfähigkeit. Demnach beinhalten die meisten der jüngsten Entwicklungen nicht-uniforme Auflösungen wie Gitterstreckung. Gitterverfeinerung oder konventionelles ein-Wege oder zwei-Wege Nesting und ähnliche Optionen um in der Lage zu sein die Modelle auf flächenlimitierten Gebieten laufen zu lassen.

Diese Situation war der initiale Ausgangspunkt für diese Arbeit. Der Wunsch nach hoch aufgelösten Simulationen mit den limitierten Computerressourcen impliziert, dass neue oder angepasste Parametrisierungen notwendig werden bzw. sind. Dabei ist sehr wichtig, dass die Parametrisierungen skalenunabhängig sind, um der Funktion der Skalen-Anpassung des ICON Gitters gerecht zu werden.

Die meisten neu entwickelten nicht-hydrostatischen Globalmodelle benutzen etablierte und verlässlich funktionierende subskalige Schemata, wie z.B. das Smagorinsky-Schema (1963) mit der Erweiterung von Lilly (1962). Dies ist auch in ICON implementiert. Die Funktionalität dieses Schemas wurde oft getestet und ist als gut funktionierend angesehen. Aber, wie schon zuvor beschrieben, beinhaltet die multi-skalige Natur des ICON Modells eine sehr hohe Anforderung an die Skalenkonsistenz der subskaligen Schließung und der Parametrisierung der turbulenten Flüsse.

Darüber hinaus, war für das ICON Modell mit seiner ikosaedrigen adaptiven Gitterstruktur keine gründliche Diagnose der Modellergebnisse mit Fokus auf der atmosphärischen Grenzschichtstruktur und turbulentem Transport bis zu dem Zeitpunkt erfolgt. Ebenso ist es notwendig zu testen ob die Profile der atmosphärischen Grenzschichtgrößen, wie potentielle Temperatur und spezifische Feuchte, sowie die Profile der Flüsse und Varianzen korrekt simuliert werden. Dies gilt ebenso für die Analyse ob die subskaligen Parametrisierungen in ICON skalenkonsistent sind. In anderen Worten, es

gab keine anderen Quellen, die sich mit ähnlichen Ergebnissen oder Methoden im Hinblick auf ICON Modell-Simulationen befassten. Die Entwicklung der Wavelet-Methode, bei der mit den Wavelet-Komponenten als Repräsentanten der verschiedenen Skalen und dessen Korrelationen der Zustandsvariablen die Zusammenhänge der unterschiedlichen Skalen besser verstanden werden können, ist, den Kenntnissen der Autoren nach, zudem auch komplett neu.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

**S1.3.1 und S1.3.5:** Im Vorhaben wurde insbesondere mit den Kollegen in Projekt M1 vom Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) in Hamburg zusammengearbeitet.

Bei der Portierung des Modellsystems auf den Supercomputer JUQUEEN waren die Kollegen des „Sim Lab Climate Science“ am Jülich Supercomputing Centre (JSC) behilflich.

Innerhalb des Projekts gab es eine sehr gute Zusammenarbeit mit den S1 Teilprojekten 1 und 2. Aus der Zusammenarbeit mit der Universität Leipzig in Teilprojekt 2 entstand der Prototyp einer komplexen Online-Diagnostik zur Berechnung von joint-PDFs. Aus der Zusammenarbeit mit dem Zuse Institut Berlin in Teilprojekt 1 ging die gemeinsame Antragstellung und eine Fortführung der Arbeiten zur Integration von Online-Featuretracking, sowie die Kombination mit dem Trajektorienwerkzeug in Phase II des Vorhabens hervor.

Aus der Zusammenarbeit mit der Ludwig Maximilian Universität München in O3 entstand die Online-Diagnostik zur synthetischen Satellitenbilderstellung.

Die Nutzung der MESSy Infrastruktur und die Vorstellung des Projektes bei den EMAC Symposia förderte weiterhin die Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des MESSy Konsortiums, insbesondere der Uni Bonn und des Forschungszentrums Jülich.

Bezüglich des Trajektorienwerkzeugs, stehen wir weiterhin in Verbindung zu Heini Wernli von der ETH Zürich, der auch in Phase II des Projekts assoziierter Partner ist.

**S1.3.2:** Für die Definition der Diagnostiken wurde intensiv mit den Projekten HD(CP)<sup>2</sup>-S2 – Stochastics, HD(CP)<sup>2</sup>-S3 – Ice Clouds und HD(CP)<sup>2</sup>-S5 – Uncertainty zusammengearbeitet. Die Implementierung im HD(CP)<sup>2</sup>-Modell basierte auf einer intensiven Zusammenarbeit im S1-Projekt.

Daneben fand eine internationale Zusammenarbeit mit dem Geophysical Fluid Dynamics Laboratory an der Universität Princeton (USA) statt, einschließlich eines mehrmonatigen Forschungsaufenthalt (DAAD-finanziert) des Projektwissenschaftlers.

Im Zuge der Nutzung des ICON-Modells entwickelte sich eine enge Zusammenarbeit mit Kolleginnen und Kollegen am Deutschen Wetterdienst (Offenbach) und dem Max-Planck-Institut für Meteorologie (Hamburg).

**S1.3.3:** Es wurde mit mehreren HD(CP)<sup>2</sup> -Teilprojekten intensiv zusammengearbeitet.

Die Kooperation mit M1, Deutsches Klima Rechenzentrum (DKRZ), erstreckte sich auf Datenverwaltung, Datenaustausch von HD(CP)<sup>2</sup>-Daten, Softwareintegration und Visualisierung. Aus der Zusammenarbeit ergaben sich zwei Publikationen (Kuhn et al., 2015; Heinze et al., 2016).

Die Kooperation mit Teilprojekt S4 und M6 erstreckte sich auf die Entwicklung von Merkmalsdefinitionen und der Trackingmethodik, den Austausch von Modelldaten und Datenevaluation. Die Ergebnisse der Zusammenarbeit flossen in entstandene Publikationen ein (Kuhn et al., 2013).

Die Zusammenarbeit mit Teilprojekt O2 und O4 umfasste Methodenentwicklung, Auswertung von Trackingdaten und objektbasierte Analyse, Datenaustausch und methodischer Vergleich. Im Rahmen der Zusammenarbeit fanden Vorträge und ein Workshop statt und es entstanden mehrere Publikationen (Kuhn und Trömel, 2015; Heinze et al., 2016; Kuhn und Trömel, in Bearbeitung).



Innerhalb des Teilprojekts S1 wurde mit den Arbeitspaketen S1.3.1 und S1.3.5 (DLR) in den Bereichen Softwareentwicklung, Entwicklung und Design der merkmalsbasierten Methodik, Datenaustausch, Schnittstellen und Trajektorien-basierte Auswertung zusammengearbeitet. Im Rahmen der Kooperation fanden mehrere Treffen und ein Workshop statt. Die Ergebnisse der Zusammenarbeit flossen in mehrere Publikationen ein (Kuhn et al., 2014, 2015; Engelke et al., 2014). Des Weiteren ging aus der Zusammenarbeit der gemeinsame Antrag für die HD(CP)<sup>2</sup>-Phase II hervor.

Die Zusammenarbeit mit Teilprojekt M2, Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), umfasste den Austausch von LES- und ICON-Modelldaten, Methodenentwicklung, Vergleich von Tracking-Methoden, Datenauswertung, Entwicklung von Merkmalsdefinitionen für hochaufgelöste LES-Daten. Die Ergebnisse der Zusammenarbeit flossen in mehrere Publikationen ein (Kuhn und Trömel, 2015; Günther et al., 2016; Kuhn et al., 2015a; Heinze et al., 2016).

**S1.3.4:** Die Zusammenarbeit mit anderen Stellen belief sich nur auf kleine Interaktionen bezüglich Daten, Modellierung mit ICON, diagnostische Prozeduren, etc. Es wurde vor allem mit dem MPI für Meteorologie in Hamburg (Anurag Dipankar, Rieke Heinze, Ralf Müller), dem DKRZ und dem S1-Teilprojekt kommuniziert.

## II. Eingehende Darstellung

### 1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

#### **S1.3.1 und S1.3.5: Diagnostische Infrastruktur und Online Trajektorien**

Die Reduzierung des Volumens an Ausgabedaten von numerischen Modellsimulationen auf High Performance Computern (HPC) ist ein Thema aktueller Forschung. Aktuelle Studien schlagen eine Komprimierung der Daten, entweder vor der Übertragung über das interne Datennetzwerk oder unmittelbar beim Schreiben auf die Platte vor (Kunkel et al. 2014; Kuhn et al. 2016).

Kunkel et al. (2014) untersuchen das Potential verschiedener Ansätze, die Datenflut, die durch aktuelle hochaufgelöste Simulationen entsteht, einzudämmen. Kuhn et al. (2016) vergleichen die Eignung verschiedener Kompressionsverfahren und schlagen ein für den Nutzer transparentes Verfahren der automatischen Kompression vor. Die Eignung zur Kompression mit einem bestimmten Verfahren ist jedoch nicht für alle Modellvariablen gleich, daher wird eine gewisse Heuristik benötigt, die das passende Kompressionsverfahren bestimmt. Baker et al. (2016) untersuchen den Einfluss einer verlustbehafteten Kompression von Modelldaten auf eine anschließende wissenschaftliche Analyse. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass es besonders bei einer Kombination verschiedener Ausgabevariablen in der anschließenden Auswertung zu größeren Abweichungen zu Berechnungen mit den ursprünglichen Modelldaten kommen kann. Hier liegt es am Wissenschaftler, das geeignete Kompressionsverfahren für die jeweiligen Ausgabedaten festzulegen.

Unser Ansatz zur Reduzierung des Ausgabevolumens ist, komplexe Analysen auf den Daten direkt während der Modellsimulation anzuwenden und nur das Ergebnis herauszuschreiben. In der Praxis werden wohl eine Kombination von reduzierten Feldern aus Online-Diagnostiken und Feldern in der vollen Auflösung herausgeschrieben. Aber auch diese Kombination reduziert die Datenflut. Eine Kombination mit Kompressionsverfahren ist weiterhin möglich. Durch die in der Praxis verwendete Methode des „Checkpointing“, bei der in bestimmten Intervallen Felder für den Neustart der Simulation gespeichert werden, ist jederzeit eine Wiederholung begrenzter Zeitabschnitte der Simulation mit erweitertem Modelloutput möglich. Daher können bestimmte Phänomene, die in der Analyse der reduzierten Daten deutlich werden, nochmals mit Hilfe unterschiedlicher und erweiterter Einstellungen bezüglich der Variablenausgabe untersucht werden.

Zur Erreichung der Ziele des Vorhabens wurde mittels eines Fragebogens in Zusammenarbeit mit dem Projekt O3 die relevanten Diagnostikoperatoren der Projektpartner identifiziert und weitere Informationen zu den Anforderungen der Operatoren bezüglich der räumlichen und zeitlichen

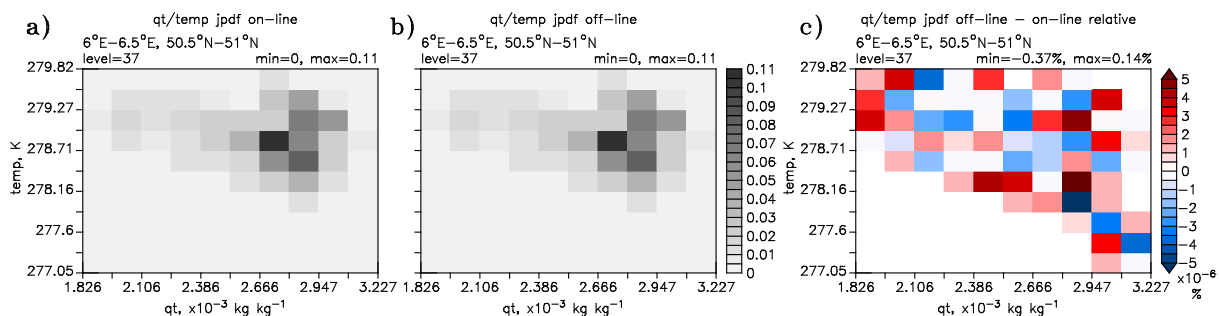


Abb 1.: Kombinierte Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (joint-PDF) von  $q$  und  $T$  aus einer Beispielsimulation in einer  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  Gitterbox. a) Berechnet mit der Online-Diagnostik, b) berechnet offline aus 3D Modelloutput, c) relative Differenz von b) und a). Die relativen Differenzen sind sehr klein und stammen von Ungenauigkeiten in der internen Repräsentation von Fließkommazahlen, d.h. die Online-Diagnostik funktioniert wie erwartet (Abb. aus Kern und Jöckel, 2016).

Strukturen eingeholt. Es wurden die fünf Operatoren MC-UNIK (Macke et al., 1999), PAMTRA (Orlando, pers. Komm.), VISOP (Scheck et al., 2016), RADVOP (Blahak, pers. Komm.) und COSP (Bodas-Salcedo et al., 2008) identifiziert, wovon die letzteren drei bereits eine gewisse Funktion zur „online“ Verwendung implementiert hatten. VISOP und COSP benötigen ausschließlich Informationen über die vertikale Struktur und können somit (zunächst) auf Basis von Modellsäulen betrieben werden.

Zur Begrenzung der Datenmenge, die bei einer hochaufgelösten Simulation diagnostiziert wird, auf ein überschaubares Niveau, bei gleichzeitiger Erhaltung der relevanten Informationen zur Evaluierung und Implementierung von Wolkenparametrisierungen, wurde im Teilprojekt 2 ein Verfahren zur Diagnose von kombinierten PDFs (joint-PDFs) entwickelt (Brueck et al., 2016). Das Verfahren arbeitet auf horizontalen Sub-Regionen und benötigt daher Methoden zur Interprozessorkommunikation, um Minima, Maxima und Histogramme über diese Sub-Regionen zu bilden. Da die Interprozessorkommunikation als kritischer Faktor zur effizienten Implementierung identifiziert wurde, wurde als Meilenstein des zweiten Projektjahres die Implementierung der komplexen Online-Diagnostik zur Berechnung von joint-PDFs festgelegt.

Nach der Planung der Datenstrukturen und Infrastruktur wurde die endgültige Implementierung auf Basis des „Modular Earth Submodel Systems (MESSy)“ (Jöckel et al., 2010) aufgebaut, da dieses bereits grundlegende Funktionen beinhaltet. MESSy wurde dazu um ICON-spezifische Anforderungen erweitert, vor allem um die Behandlung eingeschachtelter Modellgebiete mit erhöhter Auflösung („Nesting“).

In der Projektlaufzeit wurde in diesem Teilprojekt die Aggregation von Modellvariablen auf nutzerdefinierten Gittern und die Berechnung von joint-PDFs als Online-Diagnostik (GRAGG, GRid AGGregation) implementiert (Abb. 1), die die einheitliche Daten- und Schnittstellenstruktur des Diagnostikinterfaces verwendet. Damit wurde der Meilenstein des zweiten Projektjahres erreicht. Des Weiteren wurde ein Lagrangesches Subsystem konzipiert (Arbeitspaket 5) und ein Prototyp implementiert. Dieser benutzt ein „Handshaking“-Verfahren, mit dem masselose Punkte mit dem Windvektorfeld aus ICON durch das Modellgebiet über mehrere Tasks der parallelen Dekomposition verfolgt und eindeutig identifiziert werden können. Auf den Arbeiten des Arbeitspakets 5 bauen weitere Arbeiten zu Online-Trajektorien und deren Kombination mit „Feature-Tracking“ (Teilprojekt 3) in Phase II des Vorhabens auf.

Der VISOP (Visual Satellite Operator) wurde als Diagnostikwerkzeug, das die entwickelte Infrastruktur verwendet, im Teilprojekt O3 entwickelt (Scheck et al., 2016). Dieser Operator benötigt nur Säuleninformationen und kommt daher ohne Interprozessorkommunikation während der Berechnung aus. Daher arbeitet der Operator sehr effizient.

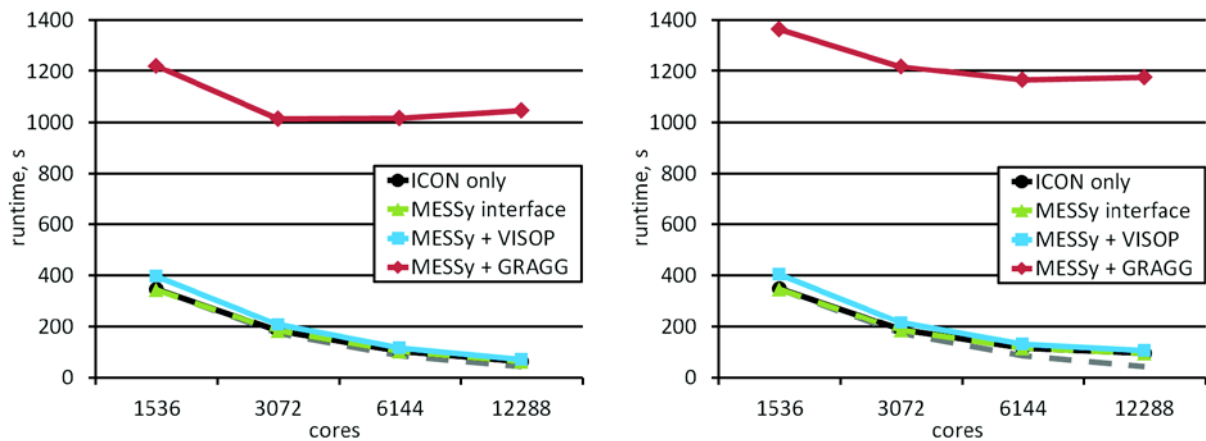


Abb. 2: Laufzeit des Modellsystems mit Verschiedenen Online-Diagnostiken. Die Fälle sind: ICON ohne Diagnostikchnittstelle, ICON mit Diagnostikchnittstelle aber ohne Berechnung von Diagnostiken, mit Berechnungen der Online-Diagnostik VISOP (Visual Satellite OPERator), mit Berechnung von joint-PDFs im Diagnostikmodul GRAGG (GRid AGGregation). Auf der linken Seite ohne Modelloutput auf der rechten Seite mit Modelloutput. Die graue Linie zeigt eine ideale Skalierung bezüglich der Anzahl von Prozessorkernen für ICON ohne Diagnostikchnittstelle. Die MESSy Schnittstelle für sich erzeugt keine zusätzliche Laufzeit im Vergleich zu ICON ohne die Diagnostikchnittstelle (Abb. aus Kern und Jöckel, 2016).

Im letzten Jahr der Projektlaufzeit wurde an der Laufzeit- und Speicheroptimierung des entwickelten Prototyps zur Berechnung von joint-PDFs gearbeitet (Abb. 2). Da dieser Operator umfangreiche Interprozessorkommunikation benötigt, erhöht dessen Anwendung die Gesamtlaufzeit des Modellsystems. Die Implementation der Online-Diagnostiken wurde daher erweitert, um einen Aufruf der Diagnostikberechnung nur zum Ausgabezeitpunkt der jeweiligen Diagnostik anzustoßen. Dadurch konnte die zusätzliche Modelllaufzeit minimiert werden (Abb. 3). Beide aktuell implementierten Online-Diagnostiken können auch parallel zur Anwendung kommen. Die Steuerung der zur Anwendung kommenden Diagnostiken und deren Parameter erfolgt durch den Nutzer über Fortran Namelists.

Laufzeitmessungen zeigen, dass die Implementierung der Diagnostikchnittstelle auf Basis von MESSy keinen Einfluss auf die Laufzeit des Modellsystems hat (Abb. 2). Die Laufzeiterhöhung durch die Anwendung von Diagnostiken hängt von den Berechnungen ab, die diese durchführen (Abb. 3). Diagnostiken, die keine Interprozessorkommunikation benötigen zeigen ein sehr gutes Laufzeitverhalten. Die Tests zeigen, dass die Diagnostikchnittstelle einsatzbereit ist. Weitere Optimierungen bezüglich Speicherverbrauch und Laufzeit der Prototypimplementierung zur Berechnung von joint-PDFs werden in Phase II des Projekts fortgeführt. Dies beinhaltet auch die Einbindung der parallelen Ausgabe, sobald diese in ICON verfügbar ist.

Während der Projektlaufzeit wurde ein Workshop zur Anwendung der Diagnostikchnittstelle durchgeführt. Vermittelt wurden dabei anhand von Vorträgen und eigenen Entwicklungen der Teilnehmer die Anwendung der Daten- und Schnittstellenstruktur, die auf Basis von MESSy angeboten wird. Die in der Praxis einfache Handhabung wird durch die Implementierung des VISOP Operators durch das Teilprojekt O3 bestätigt. Die Implementierung erfolgte, von kleinen Rückfragen abgesehen, vollständig selbständig auf Basis der Vortragsfolien und Übungsbeispiele, die für den ICON-MESSy Workshop erstellt wurden.

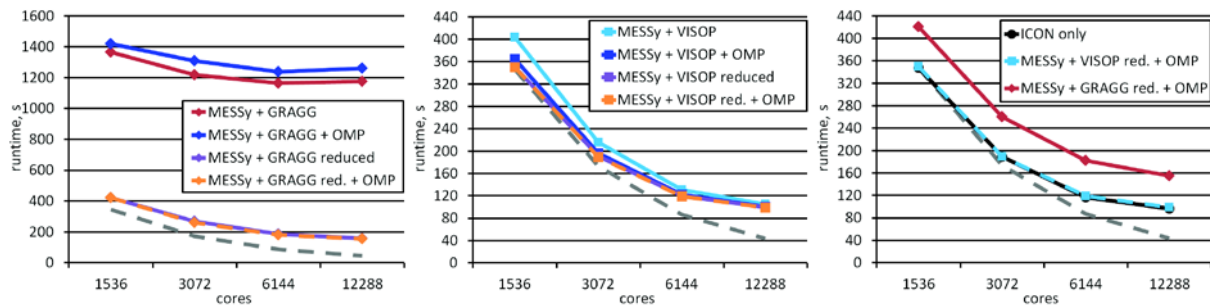


Abb. 3: Laufzeit des Modellsystems mit verschiedenen Online-Diagnostiken und verschiedenen Optimierungen. Auf der linken Seite Laufzeiten mit der Online-Diagnostik GRAGG (GRid AGGregation) zur Berechnung von joint-PDFs. In der Mitte mit der Online-Diagnostik VISOP (Visual Satellite OPerator). Rechts die optimalen Laufzeiten mit beiden Online-Diagnostiken im Vergleich zu ICON ohne die Diagnostikchnittstelle. „OMP“ zeigt eine Parallelisierung des Moduls mit OpenMP an. „reduced“ bedeutet, dass die Diagnostikberechnung nur zum Ausgabeintervall erfolgt (15 min). Die graue Linie zeigt eine ideale Skalierung bezüglich der Anzahl von Prozessorkernen für ICON ohne Diagnostikchnittstelle. Eine Reduzierung der Laufzeit ist für GRAGG nur mit Reduzierung des Berechnungsintervalls möglich. Für die Online-Diagnostik VISOP ist eine Reduzierung der Laufzeit möglich, wenn die Berechnungen mit OpenMP parallelisiert werden. Die Optimalen Laufzeiten mit den Online-Diagnostiken zeigen eine vertretbare Laufzeiterhöhung (Abb. aus Kern und Jöckel, 2016).

### S1.3.2: Multiskalige Diagnostiken von verbundenen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen

Die Grundlage für die Prognose oder Diagnose partieller Wolkenbedeckungsgrade in großskaligen Klimamodellen (GCMs) ist die Kenntnis der subskaligen Variabilität der relativen Feuchte sowie deren zeitliche Entwicklung. Diese wird grundsätzlich, explizit oder implizit, durch eine Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (PDF) beschrieben. Da die relative Feuchte von der spezifischen Feuchte  $q$  und der Temperatur  $T$  abhängt, und sich im Allgemeinen aufgrund adiabatischer Kompression oder Expansion, verursacht durch den Vertikalwind  $w$ , ändert, wird die Information - unter Vernachlässigung von Aerosolen - vollständig durch die kombinierte PDF (joint-PDF, j-PDF) von  $q$ ,  $T$  und  $w$  beschrieben. Zur Begrenzung der Datenmenge, wie sie aus Simulationen mit dem hochaufgelösten Modell diagnostiziert würde, auf ein überschaubares Niveau, bei gleichzeitiger Bereitstellung aller relevanten Informationen zur Evaluierung und Implementierung von Wolkenparameterisierungen, haben wir ein praktikables Verfahren zur Diagnose einer j-PDF entwickelt (Abb. 4). Anstelle von fest vorgegebenen Klasseneinteilungen für  $q$ ,  $T$  und  $w$  schlagen wir eine auf dem jeweiligen Minimum und Maximum eines Ausgabefeldes basierende lineare Einteilung der Klassen für jede der drei Variablen vor. Ein hochaufgelöstes Modellgebiet von  $800 \times 800 \text{ km}^2$  würde 16 Gitterboxen eines GCMs mit einer Auflösung von  $200 \times 200 \text{ km}^2$  enthalten, in welchen jeweils  $4 \cdot 10^6$  Datenpunkte des hochaufgelösten Modells bei einer Auflösung von  $100 \text{ m}$  liegen. Bei einer Klasseneinteilung in sieben Klassen für jede Achse ( $q$ ,  $T$  und  $w$ ) und zusätzlicher Speicherung der Minima und Maxima, kann die Datenmenge von 256 MByte auf 2.2 MByte für jede GCM Gitterbox verringert werden. Bei einem Diagnosezeitschritt von 20 min (entsprechend des GCM Zeitschritts) können diese Daten weiter um einen Faktor 100 auf 22 kByte komprimiert werden.

Zusätzlich zu der Diagnostik der j-PDF ist es nötig, die Einflussgrößen zu kennen, die die zeitliche Entwicklung der j-PDF determinieren. Diese Einflussgrößen lassen sich als Gebietsmittel über die grobe Gitterbox diagnostizieren; insbesondere ist die Diagnostik von Tendenzen der j-PDF-Größen relevant.

Dank der Zusammenarbeit mit Arbeitspaket S1.3.1 ist die so definierte j-PDF über das MESSy-System im HD(CP)<sup>2</sup>-Modell implementiert und kann während der laufenden Modellsimulation online diagnostiziert und herausgeschrieben werden.

Die Arbeitsgruppe (Projektleiter J. Quaas) hat die „Evaluation Task Force“, die vom Lenkungsgremium des Projekts ins Leben gerufen wurde, geleitet. Dazu wurden drei Treffen organisiert (25. - 26.

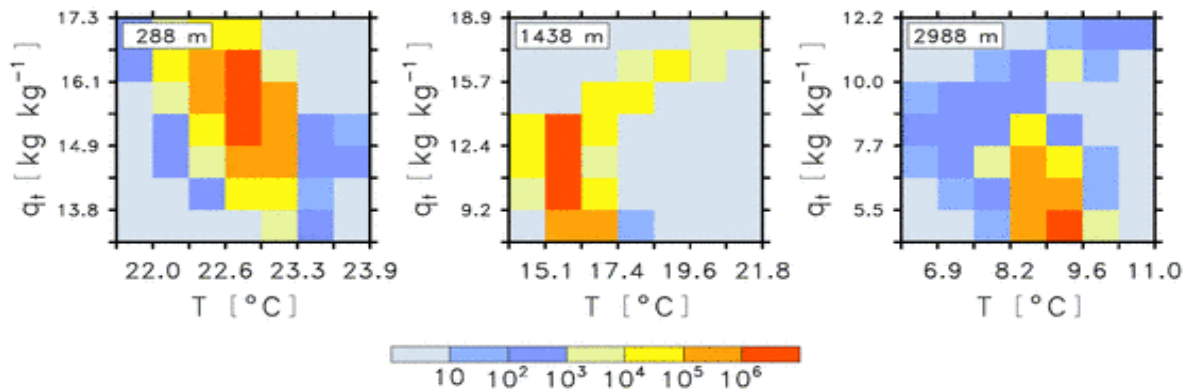


Abb. 4: Kombinierte Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (joint-PDF) von  $q$  und  $T$  für die "Rain in Cumulus over the Ocean (RICO)" Fallstudie: Passatcumulus bei Barbados. Die Large-Eddy Simulation (bereitgestellt von Thijs Heus, Universität Köln) umfasst ein Gebiet von  $100 \times 100 \text{ km}^2$  bei einer Auflösung von 25 m, d.h. ein Modellgebiet von  $4000 \times 4000$  Gitterpunkten. Die kombinierten Histogramme wurden über das gesamte Modellgebiet zu je einem Zeitschritt für den angegebenen Modellevel erstellt.

November 2013 in Leipzig, 9 Teilnehmende von 8 Instituten; 28. Oktober 2014 in Hamburg, 12 Teilnehmende von 9 Instituten; 12. Januar 2016 in Köln, 20 Teilnehmende von 12 Instituten), zusätzlich zu Breakout-Treffen bei den HD(CP)<sup>2</sup>-Vollversammlungen. In einer Koordinierungsarbeit von 1725 E-Mails (727 vom Projektleiter) wurde mit letztlich 63 Ko-Autorinnen und Ko-Autoren von 20 Instituten die Publikation Heinze et al. (2016) mit 31 Abbildungen und 5 Tabellen erstellt (derzeit „minor revisions“).

### S1.3.3: Extraktion und Tracking von Features

Der Fokus in der ersten Phase des HD(CP)<sup>2</sup>-Projektes lag auf der Entwicklung von Diagnoseverfahren für besonders große Datenmengen, wie sie durch das wolkenauflösende, großskalige ICON-Modell anfallen. Zur Validierung des Modells sind robuste, skalierbare und effiziente Verfahren notwendig, die einerseits die Informationsmenge durch Abstraktion signifikant verkleinern, für den Online-Einsatz geeignet sind und die andererseits einen Vergleich von Daten aus anderen Quellen, typischerweise mit verschiedenen Auflösungen ermöglichen (Vergleich z.B. mit Daten aus dem operativen COSMO-DE-Modell, Satelliten- und Radardaten).

Die Verwendung einer objektbasierten Diagnostik bietet im meteorologischen Umfeld eine Reihe von Vorteilen. Zum einen erlaubt sie sehr große Mengen an Rohdaten auf geometrisch relevante Strukturen zu reduzieren (z.B. Level-Sets oder Level-Set-Hierarchien zur Beschreibung von Wolken- und Niederschlagssystemen) und so die Datenmenge erheblich zu reduzieren. Zum anderen erlauben die Methoden einen strukturellen Vergleich mittels quantitativer Eigenschaften von Objekten, was bisher häufig nur durch manuelle Extraktion und visuelle Gegenüberstellung möglich war. Zudem ermöglichen generische Objekt-Extraktionsverfahren die vergleichende Analyse von Daten aus verschiedenen Quellen (z.B. Analyse von Niederschlagsobjekten in Radar-, Satelliten- und Simulationsdaten).

Hinzu kommt, dass bei der Entwicklung eines neuartigen Simulationsmodells, wie dem ICON-Prototypen, zunächst keine exakte Übereinstimmung mit Referenzdaten zu erwarten ist: gleiche Objekte sind i.A. räumlich und zeitlich versetzt, so dass ein direkter lokaler Vergleich mit Referenzdaten die Qualität eines Modells bei der Nachbildung von Prozessabläufen nur bedingt widerspiegelt. Die objektbasierte Methodik hingegen erlaubt es, den zeitlichen Ablauf von Prozessen auf phänomenologischer Ebene zu quantifizieren (z.B. Lebenszyklus von Regenzellen, Anzahl und Größe von Wolkenobjekten, Höhen- und Intensitätsverteilungen im zeitlichen Verlauf) und Modellergebnisse auf dieser Basis zu validieren und zu vergleichen (z.B. anhand von Intensitätsverteilungen innerhalb eines Objektlebenszyklus). Entsprechend definierte Merkmale

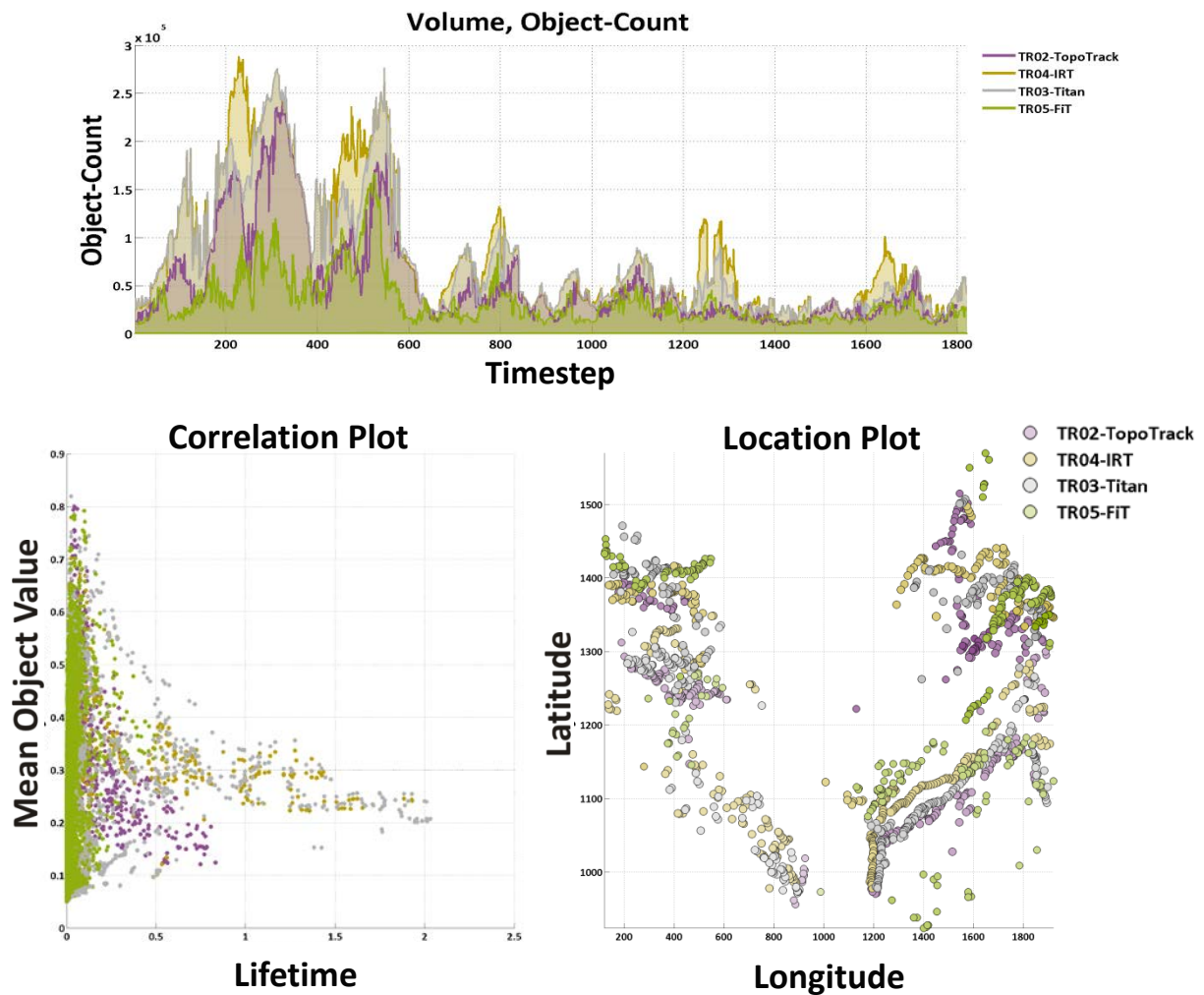


Abb. 5: Direkter Vergleich und Sensitivitätsgegenüberstellung des Konturtrackings mit drei objektbasierten Trackingverfahren (Skok et al., 2010; Dixon und Wiener, 1993; Moseley et al., 2013) basieren auf standardisierten Ausgaben und Vergleichsdatensätzen (Heus und Seifert, 2013; in Kuhn und Trömel, 2015 und Kuhn und Trömel, in Bearbeitung).

erlauben somit einen abstrakteren, dennoch aber phänomenologisch orientierten, quantitativen Vergleich von Daten verschiedener Modalität.

Die Extraktion und Verarbeitung entsprechender Merkmale wurde im Rahmen des Teilprojektes S1.3.3 umgesetzt und auf die entstandenen Daten aus dem ICON-Modell angewendet. In Ergänzung zu vorhandenen und in HD(CP)<sup>2</sup> entwickelten diagnostischen Verfahren (u.a. Analyse von PDFs, Turbulenzdiagnostik) bietet die Anwendung der objektbasierten Verfahren einen kompakten und effizienten Vergleich von Wolken- und Niederschlagsprozessen, basierend auf beobachtbaren Strukturen. Zugleich werden mit dieser Art von Analyse, je nach Verfahren, algorithmische Parameter eingeführt (z.B. Schwellwerte für die Objektextraktion, Filteroperationen für Objekte und/oder Daten), deren Einfluss auf die Analyseergebnisse berücksichtigt werden muss. Zur Validierung der entwickelten Trackingverfahren wurde zudem ein umfassender Vergleich mit existierenden Trackingverfahren durchgeführt.



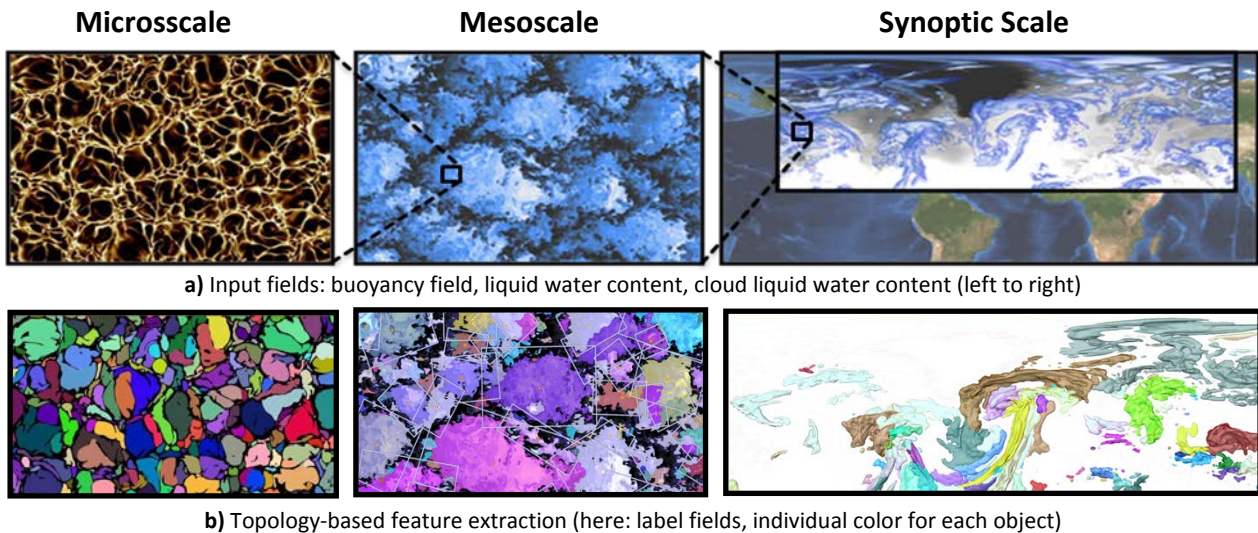


Abb. 6: Exemplarische Anwendung der entwickelten topologischen Featureextraktion auf verschiedene Skalen in entsprechenden Modellen (UCLA-LES, PALM, ECMWF Re-Analyse, von links).

Unsere Arbeit im Rahmen des HD(CP)<sup>2</sup> Projektes liefert folgende Ergebnisse:

### Entwurf und Implementierung eines Systems zur Extraktion und zeitlichen Verfolgung von Merkmalen (Features)

Das Ziel im ersten Arbeitspaket war der Entwurf und die Implementierung von Methoden zur Extraktion und Verfolgung von Merkmalen, die auf Niveaumengen (Level-Sets) von abgeleiteten Größen in Skalar- und Vektorfeldern basieren. Zudem sollte eine Festlegung der Schnittstellen für den späteren Datenaustausch erfolgen.

Hierzu wurde ein Konzept zur topologischen Extraktion von Level-Set-basierten Merkmalen in Skalarfeldern mit Hilfe von Konturgraphen (basierend auf Konturhierarchien; Carr et al., 2003; Maadasamy et al., 2012) entwickelt und umgesetzt. Ergänzend wurde, gemeinsam mit den Kooperationspartnern in M2, S1, S4 und S7 eine Liste der möglichen Zielmerkmale erstellt, als Grundlage für die Auswahl der Extraktionsmethoden. In Amira wurde ein generisches Trackingmodul, basierend auf den vorangegangenen Konzepten, realisiert. Zudem wurde in Amira eine skriptbasierten Schnittstelle für den Export/Import von Daten im NetCDF-Format geschaffen; weiterhin erfolgte die Definition der Schnittstellen für Ausgaben von spätere Tracking-Ergebnissen<sup>3</sup>. Die Ergebnisse wurden im Rahmen der HD(CP)<sup>2</sup> Projekttreffen vorgestellt (siehe Zwischenbericht 2014).

### Feature Identifikation in HD(CP)<sup>2</sup> Projektdaten

Im zweiten Arbeitspaket stand der Entwurf und Implementierung verschiedener Wolkenextraktions- und Trackingtechniken im Vordergrund. Es sollte ein geeignetes Konzept zur generischen Extraktion auf verschiedenen Datenquellen gefunden werden. Des Weiteren sollten dafür andere Modalitäten (z.B. Strömungsfelder, Wirbelmaße wie Vortizität) in die Identifikation einfließen und zu einer beispielhaften Implementierung führen. Die entsprechende Umsetzung sollte auf HD(CP)<sup>2</sup> bezogene Daten (insbesondere LES Modelle und ICON) angewendet werden. Abschließend sollte die entstandenen Verfahren in die HD(CP)<sup>2</sup> Online-Toolbox eingearbeitet werden.

<sup>3</sup> Einzusehen unter: <http://www.zib.de/kuhn/HDCP2/>, Login: HDCP2, Cloud72Tracking, Hinweis: die Webseite wird mit Einreichung der Publikation Kuhn und Trömel (in Bearbeitung) freigegeben.

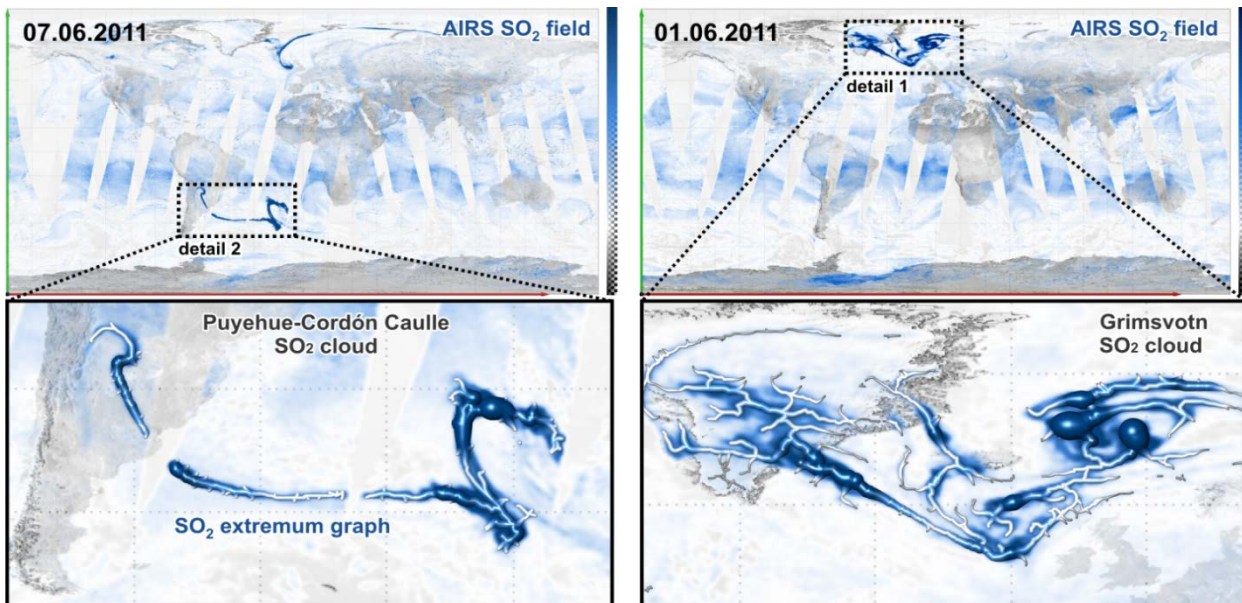


Abb. 7: Beispiel für die Extraktion topologisch geometrischer Features für meteorologische Anwendungen. Gezeigt wird der topologiebasierte Extremalgraph zur Erfassung von Spurengasen (hier:  $\text{SO}_2$ ) in nicht-stationären Satellitendaten (AIRS; siehe Engelke et al., 2014; Kuhn et al., 2015). Der extrahierte Graph eignet sich zur generischen, kompakten und geometrischen Beschreibung der räumlichen Struktur und des Verlaufes der Zielmerkmale in den Daten.

Für die Umsetzung wurden drei verschiedene Trackingverfahren entwickelt und implementiert: Ein Kontur-basiertes Tracking für 2- und 3-dimensionale zeitabhängige Daten („TopoTrack“ in Abb. 5 und in Kuhn und Trömel, 2015), ein Raum-Zeit Segmentierungsverfahren (2D zeitabhängig, verwendet in Engelke et al., 2014; Kuhn et al., 2015) und ein Verfahren basierend auf optischen Fluss (2D zeitabhängig). Die implementierten Verfahren wurden genutzt um spezifische Features in HD(CP)<sup>2</sup> relevanten Daten (u.a. Wolken auf verschiedenen Skalen, Regenobjekte) und Modalitäten (Modelldaten, Radar, Satellit) zu extrahieren.

Des Weiteren wurde ein trajektorienbasiertes (Lagrangesches) Verfahren zur Analyse, Visualisierung (Günther et al., 2016; Kuhn et al., 2013) und Extraktion (Kuhn et al., 2014, 2015a) von Features in Vektorfeldern entwickelt, das u.a. bei der Onlinetrajektorien-Diagnostik eingesetzt werden soll. Die Verfahren wurden für Daten auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen angewendet (u.a. hochaufgelöste LES Simulationen, LES Simulationen mit dem ICON-Prototyp; Günther et al., 2016; Kuhn et al., 2015a). Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Anwendung der entwickelten Feature-Klassifikation (Segmentierung) auf verschiedenen räumlichen Skalen. Des Weiteren wurde ein Konzept für die geometrische Beschreibung von Features auf Basis von Extremalgraphen (siehe Abb. 7) und für die Analyse meteorologischer Mess- und Simulationsdaten in integrierten Datenräumen umgesetzt (siehe Kuhn et al., 2015). Die entsprechenden Ergebnisse wurden auf den HD(CP)<sup>2</sup> Projekttreffen und auf nationalen (Kuhn et al., 2013, 2015) und internationalen Konferenzen (Kuhn et al., 2014) vorgestellt.

Die Entwicklung und Anwendung der Tracking-Methodik zeigte, dass bei der Methodenentwicklung dem standardisierten Vergleich mit existierenden Trackingverfahren, sowie Parameter- und Sensitivitätsstudien, eine größere Rolle zukommen muss, als ursprünglich geplant. Im Rahmen der Evaluation des ICON Modells kam dabei insbesondere dem Vergleich zu Referenzmodellen (u.a. COSMO-DE) und Messdaten (z.B. RADOLAN Radardaten, Satellit) zentrale Bedeutung zu und erforderte zusätzliche Verarbeitungsschritte (u.a. Integration vergleichbarer räumliche und zeitliche Auflösungen, die Extraktion vergleichbarer skalarer Größen), um die konsistente Anwendung der Trackingmethodik sicherzustellen. Eine alleinige Auswertung des prototypischen ICON Modells auf



der höchsten Auflösungsstufe ohne entsprechende Referenzergebnisse hätte zu diesem Zeitpunkt nur geringere Erkenntnisse hinsichtlich der Qualität des Modells geliefert.

Aus diesem Grund wurde der Fokus von der prototypischen Online-Implementierung hin zu einem Evaluations- und Vergleichsframework für die Trackingevaluation verschoben (siehe Zwischenbericht März, 2015). Im Rahmen dieser Arbeiten entstand ein skriptbasiertes Framework zur teilautomatisierten, generischen Auswertung von Trackingdaten (in Matlab für Kuhn und Trömel, 2015 und Kuhn und Trömel, in Bearbeitung) aus verschiedenen Trackingmethoden, Parametrisierungen, und Modalitäten. Exemplarische Beispiele dieser Auswertung sind in Abb. 5 dargestellt.

### **Feature Tracking und Anwendung**

Im dritten Arbeitspaket waren der Test und die Verbesserung der entwickelten Identifikations-, und Trackingverfahren vorgesehen. Dazu zählten die Entwicklung zusätzlicher Trackingfunktionalität und eine prototypische Online-Implementierung für ICON.

Das Trackingframework wurde im Rahmen einer Vergleichsstudie verschiedener Trackingsysteme (in Kuhn und Trömel, 2015 und Kuhn und Trömel, in Bearbeitung) angewendet die entwickelten Trackingmethoden, Parametereinstellungen und Auswertungen anhand relevanter Vergleichsdatensätze mit LES-Daten verglichen (u.a. Heus und Seifert, 2013). Die Featureextraktion und das Tracking wurden erfolgreich auf prototypische ICON-Daten angewendet und es erfolgte eine Auswertung und ein Vergleich verschiedener Trackingstatistiken zur Analyse von LES-Daten (u.a. aus ICON, UCLA-LES und PALM LES, in Zusammenarbeit mit M1 und M2), ein objektbasierter Vergleich gegen andere Modalitäten (RADOLAN, COSMO, ICON; in Heinze et al., 2016, in Zusammenarbeit mit O2, S4, S7 und M2) und Sensitivitätsstudien zu Tracking-Parametern. Diese Arbeiten erfolgten im Rahmen der ursprünglich geplanten prototypischen Online-Implementierung.

Das entwickelte Extremalgraph Konzept wurde zum Tracking von Wolkenstrukturen in Satellitendaten (Kuhn et al., 2015) und in integrierten Datenräumen (d.h. bestehend aus Mess- und Simulationsdaten mit variabler räumlicher und zeitlicher Auflösung) verwendet, sowie zum Wolkentracking in Satellitendaten (Engelke et al., 2014, in Kooperation mit S1.3.1). Zudem wurde die trajektorienbasierte Analysemethodik weiterentwickelt und auf verschiedene Datenbeispiele im HD(CP)<sup>2</sup> Kontext angewendet (publiziert in Kuhn et al., 2014, 2015a; Günther et al., 2016). Im Oktober 2015 wurde ein Workshop zur praktischen Anwendung der entwickelten Trackingverfahren in Amira in Hans-Ertel Zentrum in Bonn (zusammen mit S7 und O2) durchgeführt.

### **Fortgeschrittene Multi-modale Feature Identifikation, Tracking und Visualisierung**

Im letzten Arbeitspaket war die Untersuchung von annahmefreien Mustererkennungsmethoden, einschließlich deterministischer und stochastischer Modelreduktionsansätze, vorgesehen. Zudem sollte eine für Produktionsläufe geeignete Version mit verschiedenen Featureidentifikations- und Trackingfunktionalitäten realisiert werden.

Es wurde gezeigt, dass die entwickelten topologischen Methoden als annahmefreier Ansatz für die geplanten Analyseszenarien praktisch einsetzbar sind. Dies gilt sowohl für eine Vielzahl von Modalitäten (Kuhn et al., 2015; Heinze et al., 2016), als auch für verschiedene Level-Set-basierte Featuredefinitionen (u.a. für zwei- und dreidimensionale Niederschlagsobjekte, Wolkenobjekte und Strömungsmerkmale wie Auftriebszellen, Wirbelstrukturen, Ein-/Ausflussgebiete; Kuhn et al., 2015a). Es wurde demonstriert, dass die Extraktionsmethodik auf verschiedenen räumlichen Skalen Anwendung finden kann (u.a. Kuhn et al., 2015a) und die Extraktion von Featurestatistiken zur Beschreibung und zum Vergleich objektbasierter, phänomenologischer Merkmale in den Daten geeignet ist. Aussagekräftige stochastische Analysen der resultierenden Objektstatistiken werden mit der Verfügbarkeit eines hinreichend großen Ensembles von ICON-Simulationen in Phase II durchgeführt.

Das entwickelte Framework zur Offline-Featureextraktion kam bei der Evaluation der ersten simulierten Tage des HD(CP)<sup>2</sup> ICON Modells erfolgreich zum praktischen Einsatz (Heinze et al., 2016) und wird in Phase II des Vorhabens HD(CP)<sup>2</sup> weiterhin eingesetzt. Zudem wurde eine weiterführende

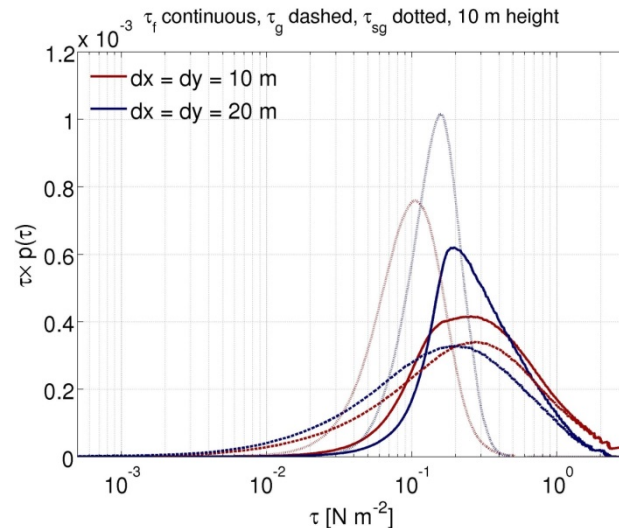


Abb. 8: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des totalen Impulsflusses ( $\tau_f$ ), des gitterskaligen Impulsflusses ( $\tau_g$ ) und des subskaligen Impulsflusses ( $\tau_{sg}$ ) mittels des WRF Modells simuliert; mit 10 m und 20 m räumlicher Auflösung. Dieses Beispiel zeigt, dass das subskalige Schließungsschema innerhalb der Bewegungsgleichung nicht skalenkonsistent ist.

Technik zur Visualisierung von trajektorienbasierten Features auf HD(CP)<sup>2</sup> Daten angewendet und publiziert (Günther et al., 2016), die künftig in Kombination mit dem entwickelten Online-Trajektorienwerkzeug eingesetzt werden soll.

Die Dokumentation und Berichterstellung erfolgte im Rahmen der Projektberichte und veröffentlichten Publikationen. Die entwickelte Trackingdiagnostik wird auf der Projektseite (<http://hdc2.zmaw.de/>) mit Abschluss der Arbeiten an Kuhn und Trömel (in Bearbeitung) publiziert und steht in den Projektteilnehmern in Phase II zur Verfügung.

### S1.3.4: Multiskalen Turbulenzdiagnostik

Die erste Aufgabe des Unterprojektes war es ein Diagnosepaket für die Turbulenz zu entwickeln und anzuwenden um die Güte der modell-simulierten Turbulenzcharakteristiken zu testen. Solch ein Tool wurde entwickelt und nutzbar gemacht. Es wurde zum Beispiel getestet ob die subskalige Schließung in einem der populärsten Wettermodelle, dem Weather Research and Forecasting (WRF) Modell, skalenkonsistent ist. Simulationen mittels WRF wurden mit verschiedenen Auflösungen von z.B. 10 und 20 m getätigt, und Impulsflüsse in verschiedenen Höhen (z.B. 2 und 10 m) berechnet. Hierbei kann der totale Impulsfluss,  $\tau_f$ , beschrieben werden als

$$\tau_f = \tau_g + \tau_{sg},$$

wobei  $\tau_g$  der gitterskalige Impulsfluss ist und  $\tau_{sg}$  dem parametrisierten subskaligen Impulsfluss entspricht. Diese Flüsse und deren Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF) wurden aus den Modelldaten berechnet. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel dieser Auswertungen. Deutliche Unterschiede existieren in den Mittelwerten von  $\tau_f$ , wenn zwei unterschiedliche Auflösungen benutzt werden.

Unterschiede sind auch in den PDFs von  $\tau_f$  klar erkennbar. Unsere diagnostische Arbeit hat also gezeigt, dass die implementierte Schließung der Subskalen nicht skalen-konsistent ist. Die gleiche diagnostische Analyse wurde für das innerhalb von HD(CP)<sup>2</sup> gewählte Modell, ICON, durchgeführt.

Aufgabe 2 war die Skalenkonsistenz der Turbulenzschließung von ICON zu untersuchen. Das wurde zunächst mittels der Wavelet-Analyse Methode durchgeführt. Die Tests nutzten verschiedene Modellauflösungen mittels multiple Nesting des WRF Modells (10 m, 40 m, 160 m, 640 m und 2560 m). Ergebnisse zeigen, dass die mittels verschiedenen Schließungen berechneten Flüsse erhebliche Unterschiede aufweisen. Dieser Test wurde auf ähnliche Weise auch mit dem ICON Modell durchgeführt. Zudem wurden Analysen betrieben um das Verhalten der Flüsse auf verschiedenen

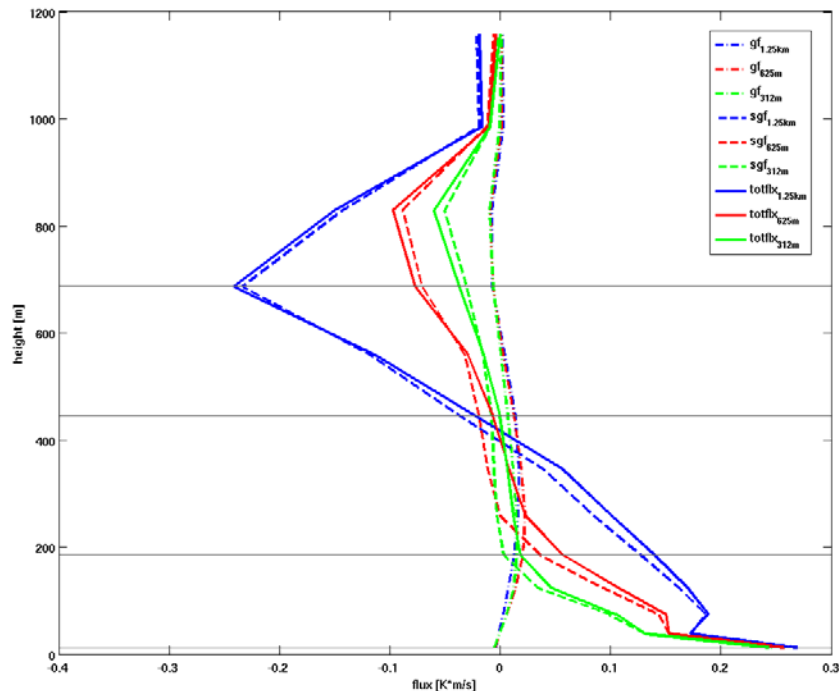


Abb. 9: 24. April 2013, 12 UTC: Vergleich von gitterskaligem (-.), subskaligem (- -) und totalem Wärmefluss (-).

Skalen besser zu verstehen, damit eine verbesserte Schließung der subskaligen Flüsse eventuell entwickelt werden kann. Dies erfolgte mittels der Berechnung einer Flussmatrix, z.B. für den fühlbaren Wärmefluss  $\overline{w\theta}$ . Durch mehrfache Filterung des Modell Outputs wurden  $w$  und  $\theta$  in Vektoren mit skalenabhängigen Komponenten zerlegt, z.B.  $(w_1, w_0)$  und  $(\theta_1, \theta_0)$ , sodass sich folgende Flussmatrix ergibt:

$$\overline{w\theta} = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_0 \end{pmatrix} \cdot (\theta_1, \theta_0) = \begin{bmatrix} w_1\theta_1 & w_1\theta_0 \\ w_0\theta_1 & w_0\theta_0 \end{bmatrix}$$

Die Komponenten der Matrix repräsentieren die Beiträge der verschiedenen Skalen zum Fluss und die überkreuz-skaligen Beiträge, wenn die Zerlegung keine orthogonale Basis besitzt. Es wurde gezeigt, dass die Skalen nahe der gitteraufgelösten Skala am meisten zum subskaligen Fluss beitragen, nicht die Skalen, die viel kleiner als diese sind, wie es in der K-Theorie angenommen wird. Die Smagorinsky-Schließung, die in ICON implementiert ist, basiert im Wesentlichen auf der K-Theorie. Basierend auf unserer Hypothese und den vorläufigen Ergebnissen, ist es sehr interessant zu sehen wie sich die Schließung in ICON verhält.

Die Skalenkonsistenz der Schließung in ICON wurde mittels der Ergebnisse der „ICON Status Simulation“ für den 24. April 2013 und den 26. April 2013 untersucht. Der erstgenannte Tag war ein präfrontaler Fall mit einer turbulenten Schicht, die bis zu ca. 700m reichte. Der 26. April dagegen war ein postfrontaler Tag mit Turbulenz limitiert auf eine flache Schicht und größtenteils einer stabilen Grenzschicht, die schon bei ca. 400m anfing. Die Profile des fühlbaren Wärmeflusses wurden für verschiedene Modellauflösungen von ICON (Nesting) analysiert.

Abbildung 9 zeigt den gitterskaligen, den subskaligen und den totalen Wärmefluss für den 24. April 2013 um 12 UTC. Die grauen Linien zeigen die Höhenlevel, die separat analysiert wurden. Direkt ersichtlich ist, dass der subskalige und der totale Wärmefluss sehr nah beieinander liegen, wohingegen der gitterskalige Fluss sehr klein ist. Dies gilt ebenso für den 26. April 2013 (hier nicht gezeigt) und suggeriert, dass der subskalige Fluss den größten Einfluss auf den totalen Wärmefluss während der

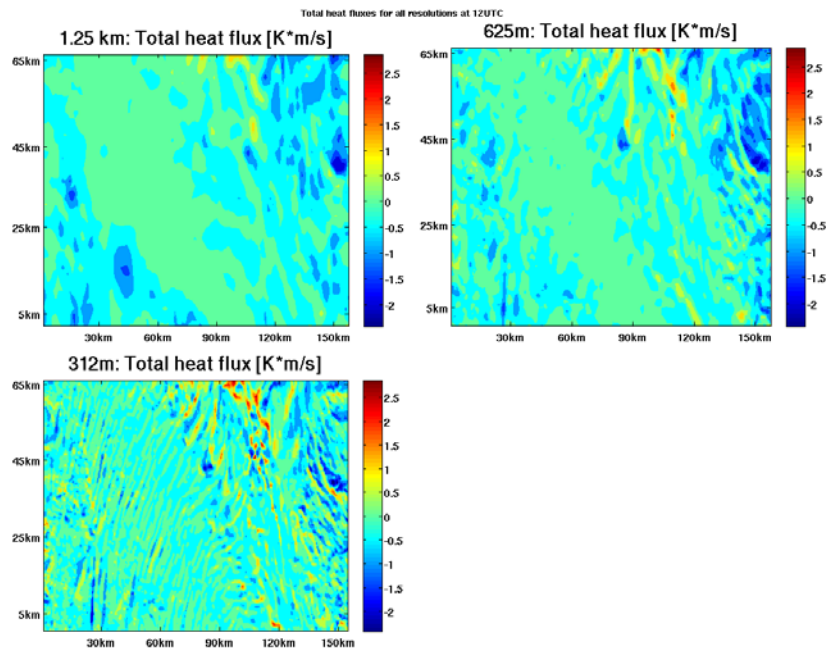


Abb. 10: 26. April 2013, 12 UTC: Totaler Wärmefluss für alle Auflösungen auf dem 445m Level.

hier untersuchten Tage ist. Zudem scheinen die Flüsse der gröberen Auflösungen viel größer zu sein, als die der feinen Auflösung.

Beim Vergleich der in Abbildung 10 dargestellten totalen Wärmeflüsse (hier für das 445 m Level), ist deutlich erkennbar, dass es Regionen mit großen Abweichungen vom gesamten Flächenmittel gibt. Aus diesem Grund wurden einige Fallstudien ausgewählt und separat analysiert, um zu sehen, ob der Vergleich der Flüsse zufriedenstellender ist.

Ergebnisse zeigen jedoch (vgl. Abb. 11), dass auch dort die Unterschiede des Modellaufs mit unterschiedlichen Auflösungen sehr groß sind. Dies veranlasst die Schlussfolgerung, dass die derzeit in ICON benutzte Schließung skaleninkonsistent ist und eine Verbesserung erforderlich ist, vor allem in größeren Höhen.

Nun versuchen wir herauszufinden was die Ursache(n) für die Abweichungen sein könnten. Wenn die Eingangsparameter für die Flüsse betrachtet werden, ist eine Möglichkeit, dass der turbulente Diffusionskoeffizient  $K$  für die groben Auflösungen in großen Höhen überschätzt wird. Es ist wahrscheinlich, dass die Mischungslänge, die in der Smagorinsky Schließung verwendet wird, zu groß ist. Zu beachten ist, dass alle benutzten Auflösungen gröber sind als die typische Größenordnung von Turbulenz.

Das Energiespektrum zeigt eine von turbulenten Wirbeln erzeugte Spitze bei etwa 100 m und in diesem Fall standen durch die „Status Simulation“ Gittergrößen von 312, 625 und 1250 m zur Verfügung, die sich alle in dem sogenannten 'Energie-Gap' befinden (siehe Abb. 12).

Als Schlussfolgerung schlagen wir vor, dass es besser wäre die gleiche Mischungslänge  $l$  für all diese drei benutzten Gitterauflösungen zu benutzen. Oder, um es etwas allgemeiner zu formulieren, für Gittergrößen größer als einen kritischen Wert  $l$  wie folgt zu definieren, damit eine Überschätzung der Flüsse von gröberen Auflösungen vermieden werden kann:

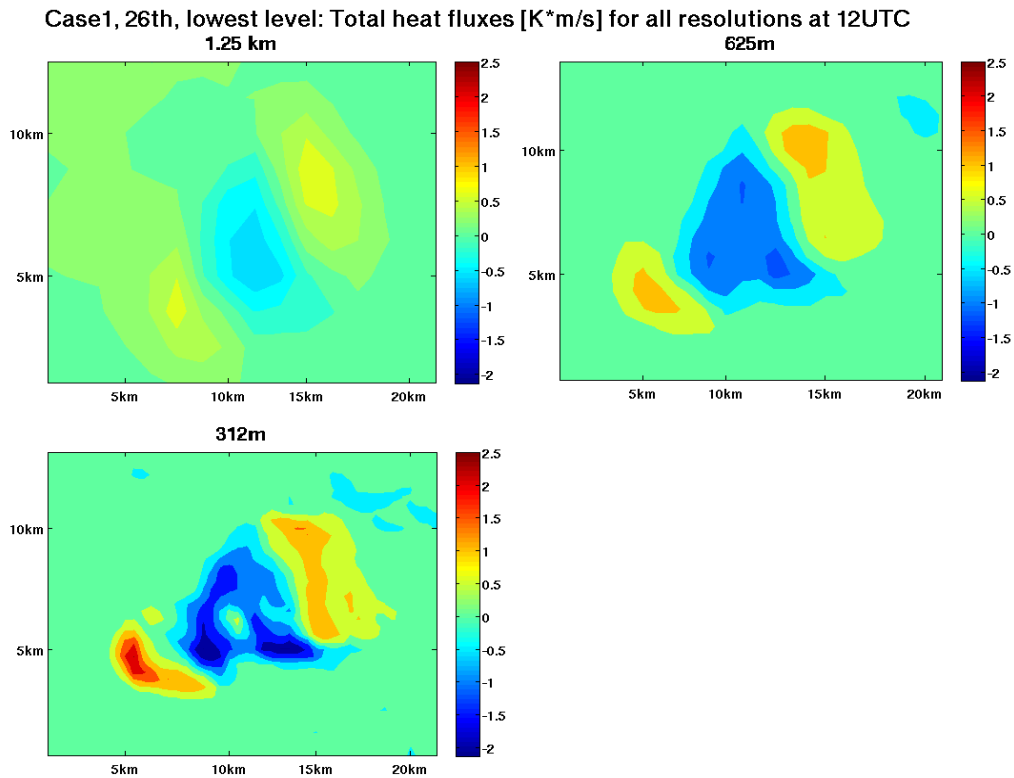


Abb. 11: 26. April 2013, 12 UTC: Totaler Wärmefluss für alle Auflösungen auf dem 10m Level für den Testcase 1.

$$l = \begin{cases} (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} & \text{for } \Delta < \Delta_c \\ const. & \text{for } \Delta \geq \Delta_c \end{cases}$$

Weiterführende Analysen leiteten uns zu der Hypothese, dass es eventuell ausreichend ist die Mischungslängendefinition für kleinskalige Turbulenz zu ändern, die nicht von der Gitterauflösung abhängt. Für größere Turbulenzen, wie z.B. Konvektion, ist allerdings eine zusätzliche Verbesserung notwendig ( $l_{mix}$ ), die ebenso die Wahrscheinlichkeit von auftretender Konvektion berücksichtigt.

Im Grunde besteht der subskalige Fluss aus zwei Typen, dem turbulent diffusen Typen (welcher durch die Smagorinsky Schließung parametrisiert wird) und dem konvektivem Typen (muss noch zusätzlich parametrisiert werden), welcher die nicht-traditionelle Turbulenz erzeugt. Um dieses Problem weiter zu untersuchen, haben wir berechnet welche Werte für  $K$  für die Auflösungen 625 m und 1250 m notwendig wären um dem Ergebnis für den 312 m Fluss zu entsprechen. Der Fluss für die feinste Auflösung von 312 m wird als der „wahre Fluss“ angenommen, oder zumindest der, der der Realität am nächsten kommt. Zu diesem Zweck nehmen wir den totalen Wärmefluss der 312 m Auflösung und den Temperaturgradient der entsprechenden Auflösung von 625 oder 1250 m um ein neues ( $K'$ ) zu berechnen. Dies wird dann mit dem  $K$ , welches ursprünglich für die jeweilige Auflösung im Modell berechnet wurde, verglichen. Leider stellte sich heraus, dass diese Annäherung schwierig umzusetzen ist, da die in ICON simulierten atmosphärischen Felder verschiedene Phasenfehler in den Modellläufen der unterschiedlichen Auflösungen besitzen.

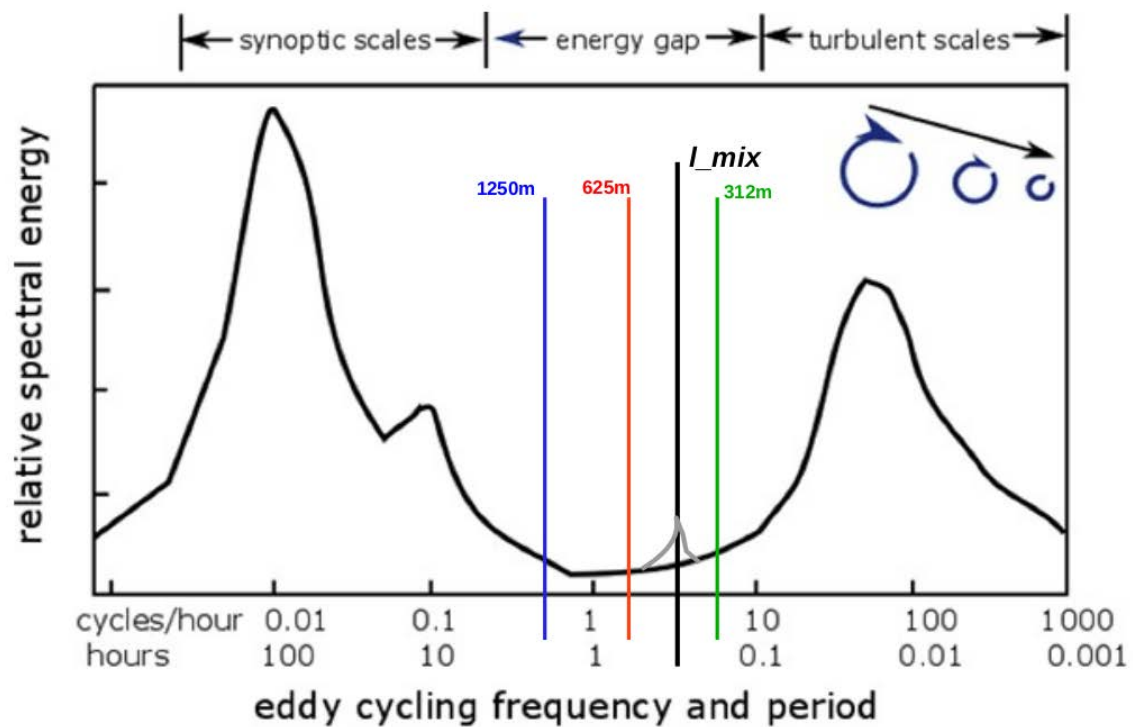


Abb. 12: Schematische Darstellung des „Energy Gaps“.

### 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Gelder wurden ausschließlich im Vorhaben HD(CP)<sup>2</sup> eingesetzt um die geplanten Arbeiten und Aufgaben durchzuführen.

Die Entwicklung einer Schnittstelle für Online-Diagnostiken in ICON und die Implementierung eines Diagnostikprototypens wurden erfolgreich abgeschlossen. Ein Prototyp des Trajektorienwerkzeugs steht zur Verfügung und wird in Phase II des Vorhabens weiterentwickelt.

Die Featureextraktions und -tracking Methoden stehen zur Auswertung zur Verfügung und werden zur Evaluation des ICON Modells und dessen Ausgaben eingesetzt. Die Offline-Methoden wurden in C++ umgesetzt und in die Visualisierungssoftware Amira integriert.

Die automatisierte Auswertungssoftware für Trackingergebnisse ist in Form von Matlab Skripten innerhalb des HD(CP)<sup>2</sup> Projektes zugänglich. Die Weiterentwicklung der Trackingverfahren und die Anbindung an Online-Analyseverfahren ist Teil der Aufgabenstellung der zweiten Projektphase.

Die Turbulenzdiagnostik der ICON Parametrisierung wurde erfolgreich durchgeführt und ein Prototyp einer neuen Schließung wurde entwickelt.

### 4. Voraussichtlicher Nutzen

**S1.3.1 und S1.3.5:** Die Implementierung einer einheitlichen Daten- und Schnittstellenstruktur für das ICON Modellsystem eröffnet einzigartige Möglichkeiten zur Analyse von (hochaufgelösten) Modellsimulationen. Die Nutzung einer einheitlichen Daten- und Schnittstellenstruktur ermöglicht die Entwicklung von Online-Diagnostiken, ohne zusätzliche Veränderungen am Basismodell ICON vornehmen zu müssen. Dies Entkoppelt die Entwicklung von Diagnostikwerkzeugen von der ICON Entwicklung und den Entwicklungen verschiedener Diagnostikwerkzeuge untereinander.

Die einfache Nutzung der implementierten Schnittstelle wurde uns während des Projektes durch die Entwicklung der Online-Diagnostik zur Erstellung von synthetischen Satellitenbildern vorgeführt. Die Entwicklung dieses Diagnostikwerkzeuges fand, abgesehen von wenigen kleinen Rückfragen, vollständig selbständig unter Verwendung der Einführung, die für den ICON-MESSy Workshop erstellt wurde, im Teilprojekt O3 statt.

Die Reduzierung der Datenmenge, die von hochaufgelösten Simulationen herausgeschrieben wird ist Gegenstand aktueller Forschung. Zur Reduzierung der Datenmenge können Online-Diagnostiken, die das Volumen der Daten durch Aggregation verringern, beitragen.

**S1.3.2:** Die Definition und Implementierung der joint-PDF ist die Voraussetzung dafür, dass nun regelmäßig in kompakter Weise bei allen Simulationen mit dem hochaufgelösten HD(CP)<sup>2</sup>-Modell alle Größen herausgeschrieben werden können, die zur Evaluierung und Weiterentwicklung von Parametrisierungen des Wolkenbedeckungsgrads auf Basis sowohl diagnostischer als auch statistischer Schemata in Klimamodellen nötig sind. Die Implementierung dieser joint-PDF kann als Ausgangspunkt genutzt werden, um andere Arten von joint-PDFs zu diagnostizieren, wie sie etwa für Wolkendiagnostiken (International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP; Rossow und Schiffer 1999 für joint-PDF mit optischer Dicke und Obergrenzendruck der Wolken, MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS; Platnick et al. 2003 für joint-PDF von effektivem Radius und optischer Dicke der Wolken; CloudSat; Stephens et al. 2002 für joint-PDF von Wolkenhöhe und Radarreflektivität; Cloud-Aerosol-Lidar with Orthogonal Polarization, CALIPSO; Winker et al., 2009 für joint-PDF von Wolkenhöhe und Lidar-Rückstreuverhältnis) nötig und nützlich sind. Daneben haben die Arbeiten zur Evaluierung den Status der Modellqualität dokumentiert und die Grundlage für Modellverbesserungen gelegt, sie haben darüber hinaus zum Prozessverständnis beigetragen.

**S1.3.3:** Die Anwendung von objektbasierten Diagnostikwerkzeugen und deren Kombination mit den in HD(CP)<sup>2</sup> entwickelten Analyseverfahren (z.B. PDFs, Online-Trajektorienmodelle) eröffnet neue, fortschrittliche Möglichkeiten bei der Auswertung hochaufgelöster und komplexer Modelldaten, wie sie im Rahmen des HD(CP)<sup>2</sup> Projektes und darüber hinaus entstehen werden. Neben der Möglichkeit der Beantwortung komplexer Analysefragestellungen (u.a. Vergleich des Verlaufs bestimmte Objektklassen in Modellen, Quantifizierung der dynamischen Interaktion von Objekten, Einfluss unterschiedlicher Parametrisierungen), erlaubt die entwickelte Methodik eine generische, kompakte und datenbasierte Strukturbeschreibung in großen Datenmengen und ergänzt damit existierende Analyseverfahren.

Die Anwendbarkeit und der potentielle Nutzen der entwickelten Methodik wurde im Rahmen der ersten Projektphase in HD(CP)<sup>2</sup> nachgewiesen, in der zweiten Phase stehen die Integration in die existierende Online-Analyse, der Ausbau der Funktionalität und die Anwendung zur Beantwortung konkreter modellspezifischer Fragen im Vordergrund.

**S1.3.4:** Das erweiterte Turbulenzschema kann sehr gut als Verbesserung der derzeit verwendeten Schließung mittels Smagorinsky-Schema mit Lilly Erweiterung genutzt und somit die Güte der Ergebnisse der Klima- und Wettervorhersage mit ICON optimiert werden. Die Implementierung ist sehr einfach und wird zunächst lokal vorgenommen. Die Änderungen am Code sind einfach und belasten das Modell bezüglich Laufzeit und Speicher nicht zu sehr. Zukünftig könnte dies also als Standard oder optional in das Modell implementiert werden. Es gibt keinen fortgeschriebenen Verwertungsplan.

## 6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

### Erfolgte Veröffentlichungen

Engelke, W., Kuhn, A., Flatken, M., Chen, F., Hege, H.-C., Gerndt, A., Hotz, I.: Atmospheric Impact of Volcano Eruptions, SciVis Contest 2014, IEEE Vis 2014, Nov 9-14, Paris, France, 10 pp., 2014.

Günther, T., Kuhn, A., Hege, H.-C., Theisel, H.: McFTLE: Monte Carlo Rendering of Finite-Time Lyapunov Exponent Fields, Computer Graphics Forum, ISSN: 1467-8659, DOI: 10.1111/cgf.12914, 2016; ZIB Report (Technischer Report), ISSN: 1438-0064, 2016.

Heinze, R., Dipankar, A., Carbajal Henken, C., Moseley, C., Sourdeval, O., Trömel, S., Xie, X., Adamidis, P., Ament, F., Baars, H., Barthlott, C., Behrendt, A., Blahak, U., Bley, S., Brdar, S., Brueck, M., Crewell, S., Deneke, H., Di Girolamo, P., Evaristo, R., Fischer, J., Frank, C., Friederichs, P., Göcke, T., Gorges, K., Hande, L., Hanke, M., Hansen, A., Hege, H.-C., Hoose, C., Jahns, T., Kalthoff, N., Klocke, D., Kneifel, S., Knippertz, P., Kuhn, A., Laar, T., Macke, A., Maurer, V., Mayer, B., Meyer, C. I., Muppa, S. K., Neggers, R. A. J., Orlandi, E., Pantillon, F., Pospichal, B., Röber, N., Scheck, L., Seifert, A., Seifert, P., Senf, F., Siligam, P., Simmer, C., Steinke, S., Stevens, B., Wapler, K., Weniger, M., Wulfmeyer, V., Zängl, G., Zhang, D., und Quaas, J.: Large-eddy simulations over Germany using ICON: A comprehensive evaluation, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., in revision.

Kern, B. und Jöckel, P.: A diagnostic interface for the ICOSahedral Non-hydrostatic (ICON) modelling framework based on the Modular Earth Submodel System (MESSy, 2.50), Geosci. Model Dev., doi:10.5194/gmd-2016-126, akzeptiert zur Veröffentlichung, 2016.

Kuhn, A. und Trömel, S.: Intercomparison Study of Cloud Feature Extraction and Tracking Algorithms, Presentation at EGU 2015, Vienna, Austria, 12-17 April 2015 (Abstract, eingeladener Vortrag)

Kuhn, A., Lindow, N., Günther, T., Wiebel, A., Theisel, H. und Hege, H. C.: Trajectory density projection for vector field visualization, EuroVis-Short Papers, 31-35, 2013.

Kuhn, A., Engelke, W., Rössl, C., Hadwiger, M., Theisel, H.: Time Line Cell Tracking for the Approximation of Lagrangian Coherent Structures with Subgrid Accuracy, Computer Graphics, Forum, 33:1, pp. 222-234, 2014.

Kuhn, A., Engelke, W., Flatken, M., Hege, H.-C., Gerndt, A., Hotz, I.: Topology-based Methods to Visualize the Atmospheric Impact of Volcano Eruptions, TopolnVis 2015, Annweiler, Germany, May, 20-22, 2015 (peer-review).

Kuhn, A., Röber, N., Hege, H.-C.: Visual Analysis of Cloud-Resolving Simulations across Scales, Supercomputing 2015, Visualization Showcase, accepted for extended showcase, 2015a (peer-reviewed).

Rosch, J., Heus, T., Brueck, M., Salzmann, M., Mülmenstädt, J., Schlemmer, L., und Quaas, J.: Analysis of diagnostic climate model cloud parameterisations using large-eddy simulations, Q. J. R. Meteorol. Soc., 141, 2199-2205, doi:10.1002/qj.2515, 2015.

Sieber, M., Kuhn, A., Hege, H.-C., Paschereit, C. O. und Oberleithner, K.: A Graphical Representation of the Spectral Proper Orthogonal Decomposition, 68th Meeting APS - Fluid Dynamics, GFM, Nov. 22-24, 2015, Boston, MA, USA., 2015 (Poster)

### Geplante Veröffentlichungen

Brueck, M., Quaas, J., Golaz, J. C. und Guo, H.: Importance of subgrid-scale temperature variability for cloud parameterizations, Mon. Wea. Rev., to be submitted, 2016.

Brueck, M. und Quaas, J.: Conceptual relationships of PDF cloud schemes. Atmos. Chem. Phys., in Vorbereitung.



Brueck, M., Quaas, J., Köhler, M. und Klocke, D.: Cloud subgrid-scale variability produced by GCMs and their large-scale evaluation using MODIS satellite observations. J. Adv. Model. Earth Syst., in Vorbereitung.

Brueck, M. und Quaas, J.: Resolved subgrid-scale variability of clouds and the implications for parametrization development. J. Adv. Model. Earth Syst., in Vorbereitung.

Kern, B., Görsch, N. und Jöckel, P.: The Lagrangian MESSy Tool for Trajectory Analysis (LaMETTA, version 1.0), in Vorbereitung für Geosci. Model Dev.

Kuhn, A., Trömel, S.: Cloud Feature Extraction and Tracking Algorithms: A review of methods and algorithms, Elsevier Atmospheric Environment, invited article (in Bearbeitung)

Die Ergebnisse des Arbeitspakets S1.3.4 werden innerhalb des angestrebten Dokortitels von Stefanie Neske in ihrer Dissertation veröffentlicht. Weitere Veröffentlichungen sind auf der Basis der Dissertation geplant.

### **Abschlussarbeiten**

Brueck, Matthias: Evaluation of statistical cloud parameterizations, Dissertation an der Universität Leipzig, Fakultät für Physik und Geowissenschaften, 185 pp., 2016.

Rörup, Birte: Distribution of water vapour in context of the parameterisation in climate models, Bachelorarbeit am Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, verfügbar unter [http://research.uni-leipzig.de/climate/roerup\\_birte\\_\\_bachelorarbeit\\_\\_2014.pdf](http://research.uni-leipzig.de/climate/roerup_birte__bachelorarbeit__2014.pdf), 29 pp., 2014.

### **Konferenzbeiträge**

Brueck, M.: Towards high resolution GCM modeling, focus convection schemes, COST action, Brac Oktober 2013.

Brueck, M.: Evaluation of PDF cloud parameterizations, Grey Zone conference, Hamburg, Dezember 2014

Brueck, M.: Evaluation of PDF cloud parameterizations, HD(CP)<sup>2</sup> conference, Leipzig, Februar 2015.

Brueck, M. und Quaas, J.: HD(CP)<sup>2</sup> - S6 PDF cloud schemes, HD(CP)<sup>2</sup> conference, Hamburg, Mai 2013.

Brueck, M. und Quaas, J.: HD(CP)<sup>2</sup> - S6 PDF cloud schemes, HD(CP)<sup>2</sup> Kickoff Conference, Köln, Mai 2013.

Brueck, M. und Quaas, J.: PDF cloud schemes, EUCLIPSE summerschool, Les Houches, Frankreich, Juni 2013.

Brueck, M. und Quaas, J.: Statistical Cloud Schemes, GEWEX conference, Den Haag, Niederlande, Juli 2014.

Brueck, M. und Quaas, J.: HD(CP)<sup>2</sup> - PDF cloud schemes, Understanding Clouds and Precipitation Conference, Berlin, 19. Februar 2016.

Brueck, M., Quaas, J. und Golaz, C.: Water vapour and cloud condensate variability simulated by statistical cloud parametrizations in GCMs, IUGG-IAMAS conference, Prag, Tschechische Republik, Juni 2015.

Jöckel, P. und Kern, B.: S1 – Interface Concept, Vortrag, HD(CP)<sup>2</sup>-M1 Workshop, Hamburg, 12.04.2013.

Kern, B. und Jöckel, P.: HD(CP)<sup>2</sup> S1 – Diagnostics: Diagnostics Interface – Concept and Status of Implementation, Vortrag, HD(CP)<sup>2</sup>-S Workshop, München, 19.09.2013.

Kern, B. und das „S1 Team“: S1 – Diagnostics: Current State, Vortrag, HD(CP)<sup>2</sup> Meeting, Hamburg, 26.02.2014.

Kern, B. und Görsch, N.: Diagnostic Interface for ICON & Online Trajectory Analysis, Poster, HD(CP)<sup>2</sup> Meeting, Hamburg, 26.-28.02.2014.

Kern, B.: MESSy as interface for diagnostic tools in ICON, Vortrag, 4. EMAC Symposium, Berlin, 14.07.2014.

Kern, B. und das „S1 Team“: S1 – Diagnostics, Vortrag, HD(CP)<sup>2</sup> Meeting, Leipzig, 25.02.2015.

Kern, B. und Görsch, N.: Diagnostic Interface for ICON & Online Trajectory Analysis, Poster, HD(CP)<sup>2</sup> Meeting, Leipzig, 25.-27.02.2015.

Kern, B.: MESSy as diagnostic interface in ICON, 5. EMAC Symposium, Jülich, 16.06.2015.

Kern, B.: On-line diagnostic tools for high resolution modelling, Poster, Understanding Clouds and Precipitation (UCP2016), Berlin, 15.-19.02.2016.

Quaas, J.: Evaluation of climate model cloud parameterisations and implications for climate, The Climate Symposium, Darmstadt, 13. - 17. Oktober 2014.

Quaas, J. et al.: Overview of HD(CP)<sup>2</sup> model evaluation, Understanding Clouds and Precipitation Conference, 19. Februar 2016.

## Literaturverzeichnis

Baker, A. H., Hammerling, D. M., Mickleson, S. A., Xu, H., Stolpe, M. B., Naveau, P., Sanderson, B., Ebert-Uphoff, I., Samarasinghe, S., De Simone, F., Carbone, F., Gencarelli, C. N., Dennis, J. M., Kay, J. E. und Lindstrom, P.: Evaluating Lossy Data Compression on Climate Simulation Data within a Large Ensemble, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, doi:10.5194/gmd-2016-146, in Begutachtung, 2016.

Bodas-Salcedo, A., Webb, M. J., Brooks, M. E., Ringer, M. A., Williams, K. D., Milton, S. F., and Wilson, D. R.: Evaluating cloud systems in the Met Office global forecast model using simulated CloudSat radar reflectivities, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, D00A13, doi:10.1029/2007JD009620, 2008.

Brueck, M., Quaas, J., Golaz, J. C. und Guo, H.: Importance of subgrid-scale temperature variability for cloud parameterizations, *Mon. Wea. Rev.*, in Vorbereitung, 2016.

Carr, H., Snoeyink, J. und Axen, U.: Computing contour trees in all dimensions, *Computational Geometry*, 24, 2, 75-94, 2003.

Dixon, M. und Wiener, G.: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting, Radar-based Methodology, 10, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 785-797, 1993.

Fiedler, F. und Panofsky, H. A.: Atmospheric scales and spectral gaps, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 51, 1114-1119, 1970.

Frisch, U.: *Turbulence*, Cambridge University Press, 1995.

Gehlot, S., und Quaas, J.: Convection-climate feedbacks in ECHAM5 general circulation model: A Lagrangian trajectory perspective of cirrus cloud life cycle, *J. Clim.*, 25, 5241-5259, doi:10.1175/JCLI-D-11-00345.1, 2012.

Heus, T. und Seifert, A.: Automated tracking of shallow cumulus clouds in large domain, long duration large eddy simulations. *Geoscientific Model Development*, 6, 4, 1261-1273, 2013.

Jöckel, P., Kerkweg, A., Pozzer, A., Sander, R., Tost, H., Riede, H., Baumgaertner, A., Gromov, S., und Kern, B.: Development cycle 2 of the Modular Earth Submodel System (MESSy2), *Geosci. Model Dev.*, 3, 717-752, doi:10.5194/gmd-3-717-2010, 2010.

Jöckel, P., Tost, H., Pozzer, A., Kunze, M., Kirner, O., Brenninkmeijer, C. A. M., Brinkop, S., Cai, D. S., Dyroff, C., Eckstein, J., Frank, F., Garny, H., Gottschaldt, K.-D., Graf, P., Grewe, V., Kerkweg, A., Kern, B., Matthes, S., Mertens, M., Meul, S., Neumaier, M., Nützel, M., Oberländer-Hayn, S., Ruhnke, R.,

- Runde, T., Sander, R., Scharffe, D., und Zahn, A.: Earth System Chemistry integrated Modelling (ESCiMo) with the Modular Earth Submodel System (MESSy) version 2.51, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1153-1200, doi:10.5194/gmd-9-1153-2016, 2016.
- Kuhn, M., Kunkel, J. und Ludwig, T.: Data Compression for Climate Data, *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 3(1), 75-94, doi:10.14529/jsfi160105, 2016.
- Kunkel, J. M., Kuhn, M. und Ludwig, T.: Exascale Storage Systems – An Analytical Study of Expenses, *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 1(1), 116-134, doi:10.14529/jsfi140106, 2014.
- Lakshmanan, V. und Smith, T.: An Objective Method of Evaluating and Devising Storm-Tracking Algorithms, *Weather and Forecasting*, 25, 701-709, 2010.
- Larson, V. E., Golaz, J.-C. und Cotton, W. R.: Small-scale and mesoscale variability in cloudy boundary layers: Joint probability density functions, *J. Atmos. Sci.*, 59 (24), 3519–3539, 2002.
- Lilly, D. K.: On the numerical simulation of buoyant convection, *Tellus*, 14, Issue 2: 148–172, 1962.
- Maadasamy, S., Doraiswamy, H. und Natarajan, V.: A hybrid parallel algorithm for computing and tracking level set topology, *HiPC '12: Proc. Intl. Conf. High Performance Computing*, 1-10, 2012.
- Macke, A., Mitchell, D. L. und Bremen, L. V.: Monte Carlo radiative transfer calculations for inhomogeneous mixed phase clouds, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(3), 237-241, doi:10.1016/S1464-1909(98)00044-6, 1999.
- Moseley, C., Berg, P. und Haerter, J. O.: Probing the precipitation life cycle by iterative rain cell tracking, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 13361-13370, 2013.
- Nam, C., und Quaas, J.: Evaluation of clouds and precipitation in the ECHAM5 general circulation model using CALIPSO and CloudSat , *J. Clim.*, 25, 4975-4992, doi:10.1175/JCLI-D-11-00347.1, 2012.
- Nam, C., Quaas, J., Neggers, R., Siegenthaler-Le Drian, C., und Isotta, F.: Evaluation of boundary layer cloud parameterizations in the ECHAM5 general circulation model using CALIPSO and CloudSat satellite data, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 6, 300-314, doi:10.1002/2013MS000277, 2014.
- Neu, U., Akperov, M. G., Bellenbaum, N., Benestad, R., Blender, R. et al.: IMILAST: A Community Effort to Intercompare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithms, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 4, 529-547, 2013.
- Pöthkow, K. und Hege, H.-C.: Positional uncertainty of isocontours: Condition analysis and probabilistic measures, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17, 10 1393-1406, 2011.
- Quaas, J.: Evaluating the "critical relative humidity" as a measure of subgrid-scale variability of humidity in general circulation model cloud cover parameterizations using satellite data, *J. Geophys. Res.*, 117, D09208, doi:10.1029/2012JD017495, 2012.
- Scheck, L., Frèrebeau, P., Buras-Schnell, R. und Mayer, B.: A fast radiative transfer method for the simulation of visible satellite imagery, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 175, 54-67, doi:10.1016/j.jqsrt.2016.02.008, 2016.
- Schemann, V., Stevens, B., Grützun, V., und Quaas, J.: Scale dependency of total water variance, and its implication for cloud parameterizations, *J. Atmos. Sci.*, 70, 3615-3630, doi:10.1175/JAS-D-13-09.1, 2013.
- Skok, G., Tribbia, J. und Rakovec, J.: Object-based analysis and verification of WRF precipitation in the low-and midlatitude Pacific Ocean, *Monthly Weather Review*, 138, 12, 4561-4575, 2010.
- Smagorinsky, J.: General circulation experiments with the primitive equations, *Monthly Weather Review*, 91(3):99–164, 1963.
- Stalling, D., Westerhoff, M. und Hege, H.-C.: Amira: a highly interactive system for visual data analysis, *The Visualization Handbook*, pp. 749–767, Elsevier, 2005.

- Stevens, B.: Introduction to UCLA-LES, November 2010, [http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/atmosphaere/herz/les\\_doc.pdf](http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/atmosphaere/herz/les_doc.pdf), Abruf: 25.02.2016.
- Sundqvist, H., Berge, E., und Kristjánsson, J. E.: Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model. *Mon. Weather Rev.* 117: 1641–1657, 1989.
- Weber, T., Quaas, J., und Räisänen, P.: Evaluation of the subgrid-scale variability scheme for water vapor and cloud condensate in the ECHAM5 model using satellite data, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 2079-2091, doi:10.1002/qj.887, 2011.
- Zängl, G., Reinert, D., Rípodas, P., and Baldauf, M.: The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141, 563–579, doi:10.1002/qj.2378, 2015.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) <b>Schlussbericht</b>	
3. Titel <b>Abschlussbericht HD(CP)<sup>2</sup> - Verbundprojekt S1 – Diagnostik</b>		
4. Autor(en) [Name, Vorname(n)] <b>Hege, Hans-Christian                      Neske, Stefanie Jöckel, Patrick                              Quaas, Johannes Kern, Bastian                                Shao, Yaping Klein, Rupert                                Spichtinger, Peter Kuhn, Alexander</b>		5. Abschlussdatum des Vorhabens <b>31.03.2016</b>
		6. Veröffentlichungsdatum <b>30.09.2016</b>
		7. Form der Publikation <b>Bericht</b>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <b>Zuse Institute Berlin (ZIB), 14195 Berlin Universität Leipzig, 04109 Leipzig Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 51170 Köln Universität zu Köln, 50923 Köln</b>		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen *) <b>01LK1213A – 01LK1213D</b>
		11. Seitenzahl <b>28</b>
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) <b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn</b>		13. Literaturangaben
		14. Tabellen
		15. Abbildungen <b>12</b>
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) <b>Projektträger im DLR (PT-DLR), 53227 Bonn, 30.09.2016</b>		
18. Kurzfassung  <b>Der Schlussbericht erläutert die Aufgabenstellung, die Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, Planung und Ablauf des Vorhabens, den wissenschaftlichen und technischen Stand, an den angeknüpft wurde und die Zusammenarbeit mit anderen Stellen.</b>  <b>Die erzielten Ergebnisse werden detailliert beschrieben und die erfolgten und geplanten Veröffentlichungen aufgeführt.</b>		
19. Schlagwörter		
20. Verlag	21. Preis	

\*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) <b>Final report</b>	
3. title <b>Abschlussbericht HD(CP)<sup>2</sup> - Verbundprojekt S1 – Diagnostik</b> (Final report HD(CP) <sup>2</sup> - S1 – Diagnostics)		
4. author(s) (family name, first name(s)) <b>Hege, Hans-Christian                      Neske, Stefanie</b> <b>Jöckel, Patrick                              Quaas, Johannes</b> <b>Kern, Bastian                                Shao, Yaping</b> <b>Klein, Rupert                                Spichtinger, Peter</b> <b>Kuhn, Alexander</b>		5. end of project <b>31.03.2016</b>
		6. publication date <b>30.09.2016</b>
		7. form of publication <b>report</b>
8. performing organization(s) (name, address) <b>Zuse Institute Berlin (ZIB), 14195 Berlin</b> <b>Universität Leipzig, 04109 Leipzig</b> <b>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 51170 Köln</b> <b>Universität zu Köln, 50923 Köln</b>		9. originator's report no.
		10. reference no. <b>01LK1213A – 01LK1213D</b>
		11. no. of pages <b>28</b>
12. sponsoring agency (name, address) <b>Bundesministerium für</b> <b>Bildung und Forschung (BMBF)</b> <b>53170 Bonn</b>		13. no. of references
		14. no. of tables
		15. no. of figures <b>12</b>
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date) <b>Projektträger im DLR (PT-DLR), 53227 Bonn, 30.09.2016</b>		
18. abstract  <b>This final report details the research tasks, the conditions under which the project was carried out, the planning and conduction of the project, the scientific and technical state at the beginning of the project, and the collaboration with other organizations.</b>  <b>The results are detailed and the publications resulting from the project are reported.</b>		
19. keywords		
20. publisher	21. price	