

High Definition Clouds and Precipitation for Climate Prediction (HD(CP)²)



Abschlussbericht

HD(CP)²-S6 – Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen für Wolkenschemata

Förderkennzeichen

01LK1218A

Zuwendungsempfänger

Universität Leipzig, Institut für Meteorologie

Projektverantwortlicher

Johannes Quaas

Projektlaufzeit

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

1. Kurzdarstellung

a. Aufgabenstellung

Im Projekt S6 sollten Klimamodell-Wolkenparametrisierungen untersucht werden, die auf Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen (probability density functions, PDFs) der subskaligen Variabilität von relativer Feuchte beruhen. Ziel des Projekts war es, eine möglichst realistische, aber gleichzeitig möglichst wenig komplexe Parametrisierung zu entwickeln, die verlässlichere Klimasimulationen ermöglichen würde. Dies sollte in Phase I auf der Basis bereits existierender Parametrisierungen geschehen, die miteinander verglichen und mit den HD(CP)²-Beobachtungsdaten evaluiert werden sollten. Die Analyse sollte für das HD(CP)²-Modellgebiet für verschiedene Wetterlagen durchgeführt werden.

b. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

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). Die Analyse, Evaluierung und Anwendung der Wolkenparametrisierung im Klimamodell wurde systematisch weiterbetrieben (Weber et al., 2011; Quaas, 2012; Gehlot und Quaas, 2012; Nam und Quaas, 2012; Weber et al., 2012; Grützun et al., 2013; Schemann et al., 2013; Nam et al., 2014).

c. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war in drei Work packages gegliedert, die wiederum in einzelne Arbeitsschritte unterteilt waren. Im ersten Work package ging es um den Vergleich der drei verschiedenen Wolkenparametrisierungen. Hierbei profitierte das Projekt sehr von Weiterentwicklungen, die schneller als bei Projektplanung verfügbar wurden (siehe Punkt 1c). So konnten die unterschiedlich komplexen Wolkenparametrisierungen bereits im ICON-Modell sowie im GFDL-Klimamodell untersucht werden (Tasks 1.1, 1.2 und 1.3). In den drei Modellen/Modellversionen wurden dann die Simulationen durchgeführt (Task 1.4) und der unterschiedliche Einfluss der Feuchte- und Temperaturvariabilität wurde untersucht (Task 1.5). Dabei wurden die Wetterlagen in verschiedenen Regionen und für verschiedene Randbedingungen (Tasks 2.1 und 2.2) im Atlantikbereich untersucht (Tasks 1.6; 2.3). Die Methode, dies im Wettervorhersagemodus durchzuführen, diente Task 3.1. Im Kontext der HD(CP)²-Modellevaluierung wurden die Wolken-PDFs auf verschiedenen Skalen und für die verschiedenen Beobachtungen untersucht (Tasks 3.1, 3.3 und 3.4).

d. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Basis der Arbeiten war das Resultat früherer Untersuchungen, dass die vorhandenen Wolkenschemata die subskalige Variabilität der Gesamtwasser-Spezifische Feuchte im Vergleich mit Beobachtungsdaten nur unzureichend simulierten (Weber et al., 2011; Quaas, 2012; Schemann et al., 2013), so dass eine genaue Untersuchung und Revision nötig war.

Eine Motivation darüber hinaus war, dass im Klimamodell ECHAM6 (Stevens et al., 2013) das einfachere Wolkenschema von Sundqvist et al. (1989) anstelle des komplexeren Schemas von Tompkins (2002) zu verwenden, das in der Vorgängerversion ECHAM5 Standard war (Roeckner et al., 2003). Es entstand die Frage, inwiefern das einfachere Schema dem komplexeren ebenbürtig oder sogar überlegen sein könnte, oder was umgekehrt der optimale Kompromiss zwischen Einfachheit und Komplexität wäre.

e. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der sehr intensiven Zusammenarbeit mit Projekt HD(CP)²-S1-Diagnostics gab es vielfältige fruchtbare Kooperationen mit anderen HD(CP)²-Projekten, insbesondere den M-Projekten. Der Erfolg des Projekts basierte darüber hinaus wesentlich auf der Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (Offenbach, Martin Köhler, Daniel Klocke) und dem Max-Planck-Institut für Meteorologie.

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.

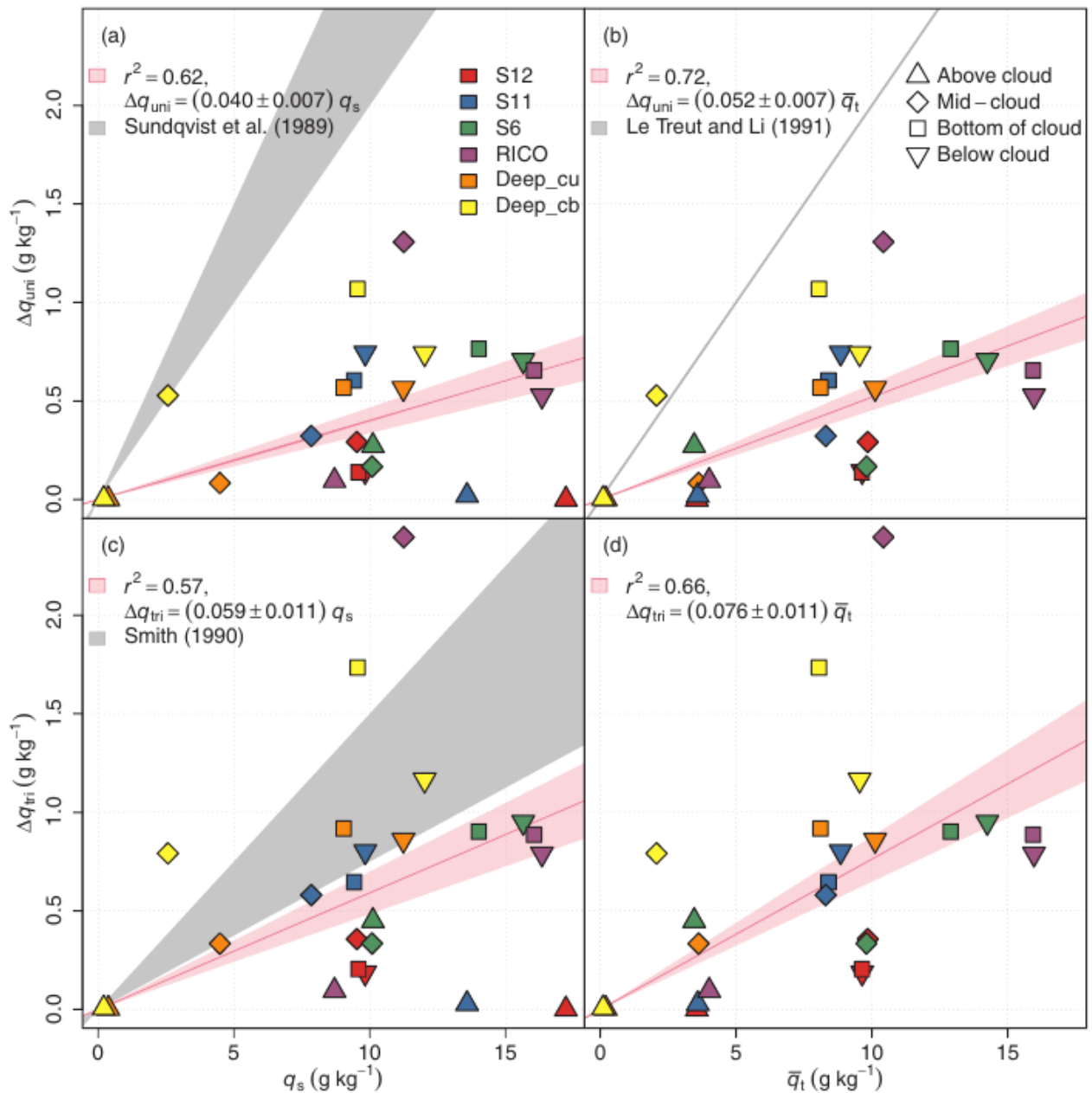


Abb. 1. Verteilungsbreite von PDFs der Gesamtwasser-Spezifischen Feuchte für eine uniforme (rechteckige) Verteilung (obere Reihe) und eine (gleichschenklige) dreieckige Verteilung (untere Reihe), als Funktion der mittleren Sättigungsfeuchte (linke Spalte) und der mittleren Gesamtwasser-Spezifischen Feuchte (rechte Spalte) für sechs verschiedene wolkenauflösende Simulationen (Farben) in vier verschiedenen Höhen (Symbole). In rot sind die Regressionsgeraden eingezeichnet, in grau, die Parametrisierungen von Sundqvist et al. (1989; a), Le Treut und Li (1991, b) und Smith (1990, c). Aus Rosch et al. (2015).

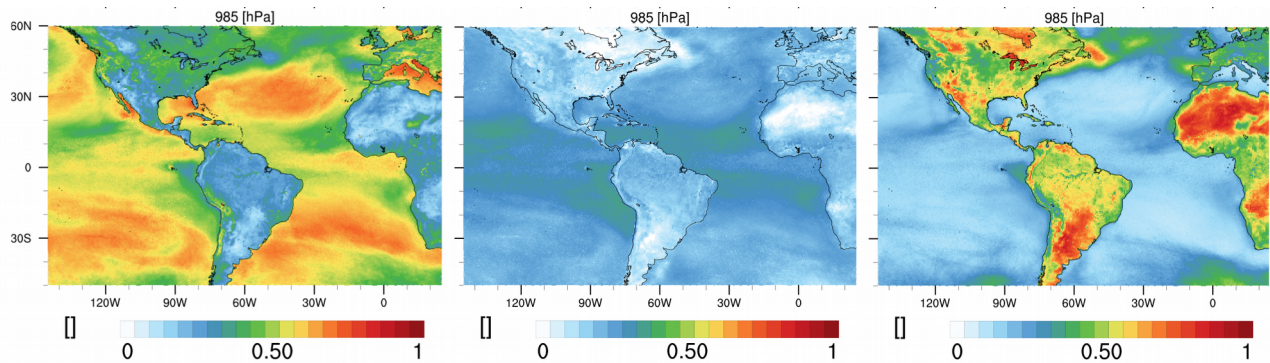


Abb. 2. Relativer Beitrag der subskaligen Variabilität von Gesamtwasser-Spezifischer Feuchte (links), Temperatur (rechts) und ihrer Kovariabilität (Mitte) zur gesamten subskaligen Variabilität des Sättigungsdefizits für eine Simulation von einem Monat mit dem GFDL-CLUBB-Modell. Aus Brueck et al. (2016).

2. Eingehende Darstellung

a. Erzielte Ergebnisse

In einer eingehenden Studie, in der verschiedene grobstrukturauflösende Simulationen (large-eddy simulations, LES) analysiert wurden, haben wir die Parameter aus einfachen Wolkenschemata verglichen (Abb. 1, Rosch et al., 2015). Im Ergebnis wurde als bester Fit an die hochaufgelösten Daten eine Dreiecksverteilung vorgeschlagen, wobei die Verteilungsbreite am Besten mit dem Mittelwert der Gesamtwasser-Spezifischen Feuchte skalieren wurde. Als bester Skalierungsparameter wurde ein Wert von 0.076 ermittelt. Es wäre in diesem Zusammenhang interessant, die Ergebnisse mit den neuen, realistischeren HD(CP)²-Simulationen zu reproduzieren bzw. zu revidieren.

In einer Analyse der komplexen "CLUBB"-Parametrisierung in ihrer Implementierung im GFDL-Modell (Guo et al., 2014; 2015) konnte die relative Bedeutung der subskaligen Variabilität der Feuchte, der Temperatur, und ihrer Ko-Variabilität quantifiziert werden, nachdem die theoretischen Vorarbeiten dafür durchgeführt worden waren (Brueck et al., 2016). Wie die Ergebnisse in Abb. 2 zeigen, ist die Temperaturvariabilität in vielen Fällen mindestens gleich bedeutend mit der Feuchtevariabilität, und dies selbst in der Grenzschicht.

Abb. 3 zeigt einen Vergleich der Wolkenschemata CLUBB und EDMF-DualM mit den Ergebnissen des hochaufgelösten HD(CP)²-Modells und des Referenzmodells COSMO, des operationellen Wettervorhersagemodells des Deutschen Wetterdienstes. Hierfür wurde die Variabilität des Flüssigwasserwegs (liquid water path, LWP) als Standardabweichung der subskaligen horizontalen Verteilung definiert und über das vertikale Integral der simulierten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen mit der Maximum-Überlapp-Annahme in den beiden Klimamodellen diagnostiziert (Brueck, 2016). Wie die Ergebnisse zeigen, ist – wenn man zunächst die hochaufgelösten Modelle mit den Satellitendaten vergleicht – in mancherlei Hinsicht das HD(CP)²-Modell dem Referenzmodell überlegen (vgl. auch Heinze et al., 2016). , indem es eine höhere subskalige Standardabweichung des LWP simuliert. Unter den beiden Klimamodellparametrisierungen ist für diese Fälle das CLUBB-Schema überlegen, was sich allerdings nicht ohne weiteres generalisieren lässt (Brueck, 2016).

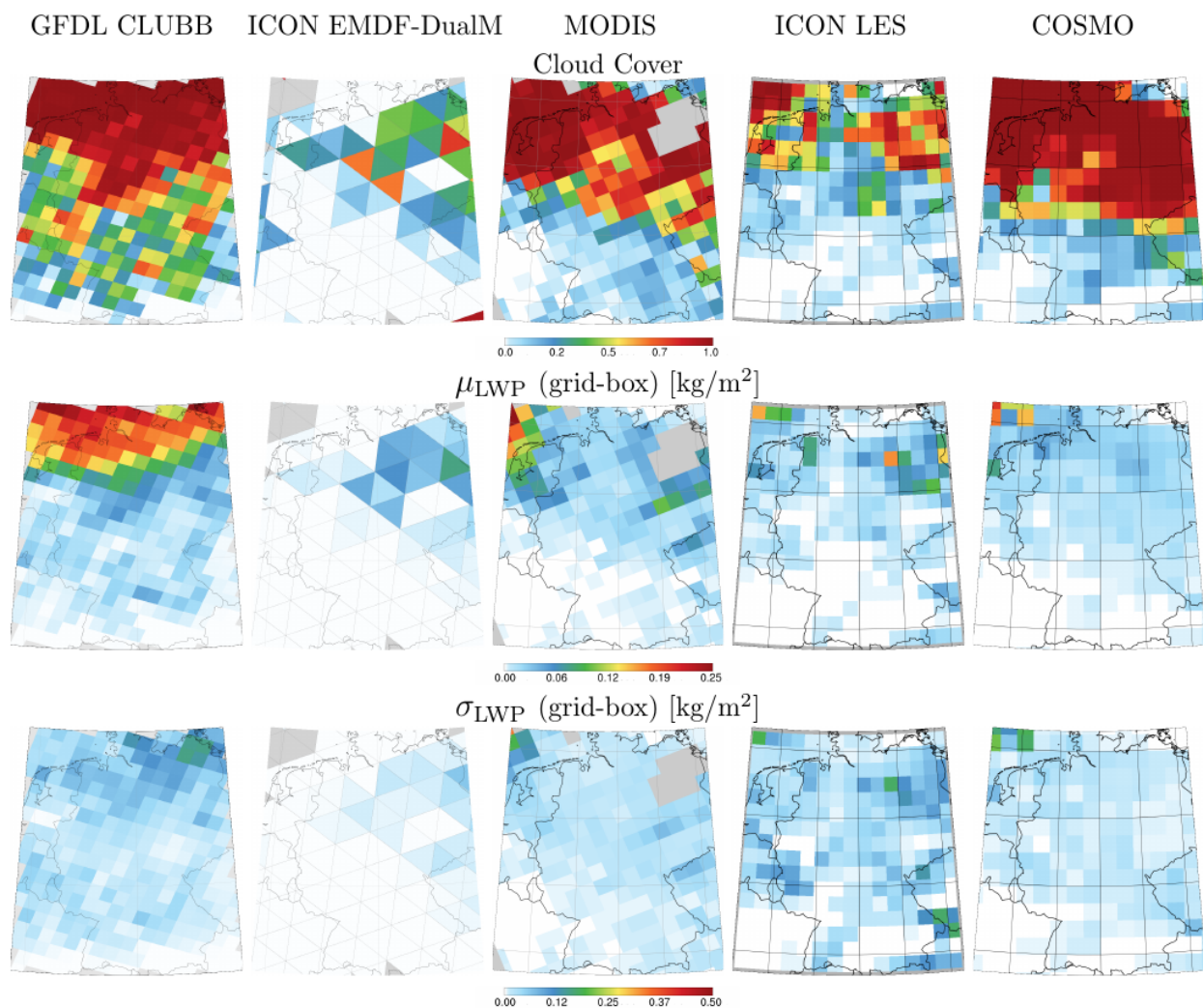


Abb. 3. Vergleich des GFDL-Klimamodells mit der CLUBB-Wolkenparametrisierung (linke Spalte), des ICON-Klimamodells mit der EDMF-DualM-Parametrisierung (zweite Spalte), MODIS-Satellitenbeobachtungen (dritte Spalte), Ergebnisse des hochaufgelösten HD(CP)²-Modells (vierte Spalte) und des Wettervorhersagemodells COSMO (rechte Spalte) für den 25. April 2013. Für die Modelle wird das Tagesmittel, für die Satellitendaten das Ergebnis zur Satellitenüberflugszeit gezeigt. Die horizontalen Auflösungen sind 50 km für das GFDL-Modell, 80 km für das ICON-Klimamodell, 1 km für die MODIS-Satellitenbeobachtungen, 156 m für das HD(CP)²-Modell und 2.8 km für COSMO. Die Daten sind auf einem Gitter von 50x50 km² ausgewertet. Obere Zeile: Mittlerer Bedeckungsgrad. Mittlere Zeile: Mittelwert des Flüssigwasserweds. Untere Zeile: Subskalige Standardabweichung des Flüssigwasserwegs. Aus Brueck (2016).

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. 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)²-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"). Ein Ergebnis im Zusammenhang mit der Analyse, die auch in Abb. 3 dargestellt ist, ist auch Teil der Publikation zur Evaluierung (Heinze et al., 2016).

b. Voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse zur Evaluierung der verschiedenen Wolkenschemata sind direkt relevant für die Modellentwicklung. Es wurden konkrete Vorschläge gemacht, welche Aspekte der komplexen Wolkenparametrisierungen von besonderer Bedeutung sind, und wo die einfachen Ansätze ausreichen

können. Daneben wurden auch auf theoretischer Basis die Schwächen der einfachen Parametrisierungen aufgezeigt. Insofern bilden die Arbeiten die Basis für eine Verbesserung von Klimamodellen.

Daneben haben die Arbeiten zur Evaluierung den Status der Modellqualität dokumentiert und die Grundlage für Modellverbesserungen gelegt, sie haben darüber hinaus zum Prozessverständnis beigetragen.

c. Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Das Projekt hat stark von den Entwicklungen seit Projektplanungen profitiert. So war das ICON-Modell früher als vorhergesehen verfügbar, und die Benutzung des ECHAM-Modells als ursprünglich geplante Ausweichmöglichkeit nicht nötig. Das ICON-Modell hat in der Klimavariante bereits das Sundvist et al. (1989)-Schema implementiert. In seiner Wettervorhersage-Variante dagegen ist das Neggers (2009)-Schema operationell.

Für dieses Projekt war darüber hinaus die Entwicklung an der Universität Princeton / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory besonders interessant, wo das neue komplexe Wolkenschema 'Cloud Layers Unified by Binormals' (CLUBB) als operationelle Parametrisierung benutzt wird (Guo et al., 2014; 2015). Dies eröffnete die Möglichkeit, eine sehr komplexe Parametrisierung als weitere Option zu analysieren.

d. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

(i) Publikationen in Fachzeitschriften

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

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

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

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

Rosch, J., T. Heus, H. M. Brueck, M. Salzmann, J. Mülmenstädt, L. Schlemmer, and J. Quaas, 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.

(ii) 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, 29 pp., 2014.

(iii) Konferenz- und Workshopbeiträge

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

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

Brueck, M., Evaluation of PDF cloud parameterizations, HD(CP)² conference, Leipzig, Februar 2015.

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

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

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

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

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

Brueck, M., und J. Quaas, HD(CP)² - S6 PDF cloud schemes, HD(CP)² kickoff conference, Köln, Mai 2013.

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)² model evaluation, Understanding Clouds and Precipitation Conference, 19. Februar 2016.

Literaturverzeichnis

- Gehlot, S., und J. Quaas, 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.
- Grützun, V., J. Quaas, F. Ament, and C. Morcrette, Evaluating statistical cloud schemes - what can we gain from ground based remote sensing?, *J. Geophys. Res.*, 118, 10507-10517, doi:10.1002/jgrd.50813, 2013.
- Guo, H., J.-C. Golaz, L. Donner, B. Wyman, M. Zhao, and P. Ginoux, CLUBB as a unified cloud parameterization: Opportunities and challenges, *Geophys. Res. Lett.*, 42 (11), 4540–4547, 2015
- Guo, H., J.-C. Golaz, L. J. Donner, P. Ginoux, and R. S. Hemler, Multi-variate probability density functions with dynamics in the GFDL atmospheric general circulation model: Global tests. *J. Climate*, 27 (5), 2087–2108, 2014.
- Le Treut, H., and Z.-X. Li, Sensitivity of an atmospheric general circulation model to prescribed SST changes: Feedback effects associated with the simulation of cloud optical properties. *Clim. Dyn.* 5: 175–187, 1991.
- Nam, C., und J. Quaas, 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., J. Quaas, R. Neggers, C. Siegenthaler-Le Drian, und F. Isotta, 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.
- Neggers, R. A. J., A dual mass flux framework for boundary layer convection. Part II: Clouds, *J. Atmos. Sci.*, 66, 1489–1506, 2009
- Platnick, S., M. D. King, S. A. Ackerman, W. P. Menzel, B. A. Baum, J. C. Riédi, and R. A. Frey: The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 459-473, 2003.
- Quaas, J., O. Boucher, und F.-M. Bréon, Aerosol indirect effects in POLDER satellite data and in the Laboratoire de Météorologie Dynamique-Zoom (LMDZ) general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 109, D08205, doi:10.1029/2003JD004317, 2004.
- 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.

- Ringer, M. A., B. J. McAvaney, N. Andronova, L. E. Buja, M. Esch, W. J. Ingram, B. Li, J. Quaas, E. Roeckner, C. A. Senior, B. J. Soden, E. M. Volodin, M. J. Webb, und K. D. Williams, Global mean cloud feedbacks in idealized climate change experiments, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07718, doi:10.1029/2005GL025370, 2006.
- Roeckner, E., G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kornblueh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida und A. Tompkins: The atmospheric general circulation model ECHAM5: Part I: Model description. Report No. 349, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, 127pp., 2003. Rossow, W. B., and R. A. Schiffer, Advances in understanding clouds from ISCCP. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 2261–2288, 1999.
- Schemann, V., B. Stevens, V. Grützun, und J. Quaas, 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.
- Smith, R. N. B., A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 116: 435–460, doi: 10.1002/qj.49711649210, 1990.
- Stephens, G. L., D. G. Vane, R. J. Boain, G. G. Mace, K. Sassen, Z. Wang, A. J. Illingworth, E. J. O'Connor, W. B. Rossow, S. L. Durden, S. D. Miller, R. T. Austin, A. Benedetti, C. Mitrescu, and the CloudSat Science Team: The CloudSat mission and the A-TRAIN: A new dimension to space-based observations of clouds and precipitation. In *Bull. Am. Met. Soc.*, 83, 1771-1790, 2002.
- Stevens, B., M. Giorgetta, M. Esch, T. Mauritsen, T. Crueger, S. Rast, **M. Salzmann**, H. Schmidt, J. Bader, **K. Block**, R. Brokopf, I. Fast, S. Kinne, L. Kornblueh, U. Lohmann, R. Pincus, R. Reichler, and E. Roeckner, [*Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6*](#), *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5, 146-172, doi:10.1002/jame.20015, 2013.
- Sundqvist H, Berge E, und Kristjánsson JE., Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model. *Mon. Weather Rev.* 117: 1641–1657, 1989.
- Tompkins, A., A prognostic parameterization for the subgrid-scale variability of water vapor and clouds in large-scale models and its use to diagnose cloud cover. *J. Atmos. Sci.*, 59, 1917–1942, 2002.
- Weber, T., J. Quaas, und P. Räisänen, 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.
- Weber, T., and J. Quaas, Incorporating the subgrid-scale variability of clouds in the autoconversion parameterization, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 4, M11003, doi:10.1029/2012MS000156, 2012.

Winker, D., Vaughan, M., Omar, A., Hu, Y., Powell, K., Liu, Z., Hunt, W., and Young, S., Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms. *J. Atmospheric and Oceanic Technology* 26, 23102323, 2009.