

ICON-ESM – Das MPI-M-Erdsystemmodell der nächsten Generation

Klima- und Erdsystemmodelle werden benutzt, um das vergangene, gegenwärtige und zukünftige Klima zu simulieren und um Prozesse, die das Klima beeinflussen, besser zu verstehen. Modelle sind die Hauptwerkzeuge für die wissenschaftliche Arbeit am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M). Mit ihrer Hilfe werden neue Ideen entwickelt und untersucht, die zum Beispiel durch Beobachtungen des Erdsystems angeregt wurden. Modellergebnisse regen ihrerseits aber auch Beobachtungen oder neue Theorien an. Das MPI-M ist in der Anwendung dieser umfassenden Modelle auf Fragen der Klimawissenschaft sehr erfolgreich, da es aufgrund seiner Expertise in Klimaphysik, angewandter Mathematik und Softwaredesign in der Lage ist, diese Modellsysteme selbst zu entwickeln.

Das neue ICON-Erdsystemmodell (ICON-ESM) des MPI-M basiert auf den Zirkulationsmodellen ICON-A (für die Atmosphäre), ICON-O (für den Ozean) und dem Landmodell (auch als JSBACH bekannt), die alle in den letzten Jahren neu entwickelt wurden. Alle Modelle nutzen ikosaedrische Gitter und die gleiche Software-Infrastruktur.

Die individuell entwickelten Modellkomponenten wurden gekoppelt und bilden so das ICON-ESM. Diese erste Integration von ICON-ESM ist ein Meilenstein und von höchster Bedeutung für das ICON-Projekt. Es bedeutet den Übergang von der Entwicklung und Nutzung der einzelnen Modellkomponenten hin zur Anwendung des angestrebten Gesamtmodells in der Klimaforschung. Die Kopplung des Kohlenstoffkreislaufs mit seinen relevanten biogeochemischen Prozessen ist noch in der Entwicklung. Mit dem physikalischen Modell wurden bereits mehrere Jahrhunderte umfassende Integrationsläufe unter vorindustriellen Bedingungen durchgeführt. Dabei lagen die Rasterabstände der Atmosphäre bei 160 km und des Ozeans bei 40 km. Die ersten Simulationsergebnisse zeigen eine Reproduktion der wichtigsten Merkmale des Klimasystems und haben ähnliche Abweichungen wie das Vorgängermodell MPI-ESM, aber mit der Anwendung eines viel flexibleren und skalierbaren Modellierungsrahmens.

Die Modellkomponenten

ICON-ESM setzt sich aus den Komponenten ICON Atmosphäre, ICON Ozean, ICON Land (JSBACH4), einem Koppler und dem Kohlenstoffkreislaufmodell HAMOCC zusammen (Abb. 1).

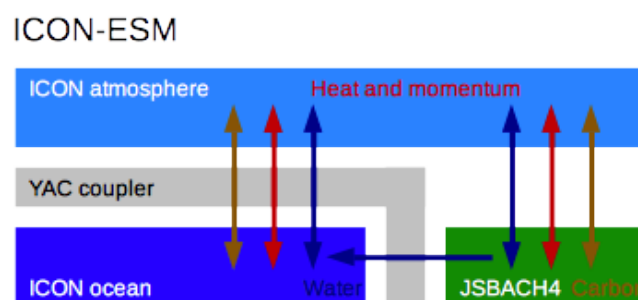


Abb. 1: Schema des ICON-ESM

Die Komponenten des physikalischen Systems tauschen Wasser, Energie und Impuls aus. Zusätzlich wird Kohlenstoff zwischen dem biogeochemischen Ozeanmodell HAMOCC und der Landbiosphäre über den CO₂-Transport durch die Atmosphäre ausgetauscht. Technisch erfolgt die Kopplung an den Ozean über den YAC-Koppler.

ICON Atmosphäre (ICON-A)

Das ICON-Atmosphärenmodell wurde gemeinsam mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) entwickelt, um ein gemeinsames Werkzeug zu schaffen, das sich gleichermaßen für die Klimaforschung und die Wettervorhersage eignet. Das ICON-Atmosphärenmodell besteht aus dem dynamischen Kern, der die voll kompressiblen Gleichungen löst, und aus drei verschiedenen Parametrisierungspaketen für verschiedene Anwendungen.

Für kleinskalige Simulationen wurde das „Large Eddy“-Modell ICON-LEM auf der Basis von idealisierten Testfällen mit einer Auflösung bis hinunter zu 50 m entwickelt und später in größeren Simulationen über dem gesamten Bundesgebiet überprüft, indem analysierte Randbedingungen und Beobachtungsdaten verwendet wurden. Das zweite Physik-Paket stammt vom DWD für dessen operationelle Wettervorhersage und wurde am MPI-M für einige idealisierte und realistische regionale Studien genutzt, wie zum Beispiel für die Simulationen in einem quasi-operationellen Modus für den tropischen Atlantik. Dieses Experiment umfasste ein Gebiet vom Osten Südamerikas bis zum westlichen Afrika mit einer Auflösung von 2,5 km und einer eingebetteten Region von 1,2 km Auflösung im westlichen Bereich. Das dritte Physik-Paket, das im ICON-ESM zur Anwendung kommt, stammt aus dem allgemeinen Zirkulationsmodell ECHAM6 und eignet sich für Simulationen bei geringerer Auflösung über längere Zeiträume (Giorgetta et al., 2017; Crueger et al., 2017). Diese Parametrisierung wurde um eine einfache Ozeanchemie mit Fokus auf die Tropopause und eine Schnittstelle zum komplexen Chemie- und Mikrophysikmodell des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) erweitert. Für die Wechselwirkung mit der Oberfläche wurde die ECHAM-Physik mit dem JSBACH4-Landmodell und per YAC-Koppler mit dem ICON-Ozeanmodell gekoppelt.

ICON Ozean (ICON-O)

Das ICON-Ozeanmodell (ICON-O; Korn and Danilov, 2017a; Korn, 2017b) ist die Ozeankomponente des ICON-ESM. Es basiert wie sein Vorgänger MPI-OM im MPI-ESM auf den primitiven Gleichungen des Ozeans. In zwei Veröffentlichungen wird die neue Formulierung des dynamischen Kerns beschrieben und eine erste Evaluation des Modells dokumentiert sowie spezielle Modelleigenschaften diskutiert. Zurzeit werden Langzeitläufe nur mit dem OMIP-Antrieb durchgeführt, um eine umfassende ozeanographische Analyse dokumentieren zu können. Zudem wird es eine Leistungsanalyse geben, um die Rechneffizienz zu beschreiben, was wiederum für zukünftige hochaufgelöste Rechnungen wichtig ist. ICON-O ist mittlerweile hinsichtlich der Funktionalität und Komplexität mit MPI-OM vergleichbar.

Das **Hamburg Ocean Carbon Cycle Model (HAMOCC)** wurde erfolgreich von der Ozeankomponente des MPI-ESM in die Ozeankomponente des ICON-ESM übertragen. Es kann sowohl allein als auch im gekoppelten Modus laufen. Das Modell umfasst marine Kohlenstoffchemie, marine Biogeochemie,

den Gasaustausch zwischen Wasser und Luft und ein Sedimentmodul. HAMOCC ist Teil der ICON-O-Implementierung in das ICON-ESM, seine Leistungsfähigkeit wird derzeit ausgewertet.

JSBACH Land

Das ICON Landmodell JSBACH4 nutzt im Vergleich zu seinem Vorgänger JSBACH3 eine neue, fortschrittlichere Software-Infrastruktur, behält aber das gleiche Spektrum an Prozessen plus Abwässern und Abflüssen in den Ozean bei. Die inhaltlichen Verbesserungen umfassen eine hierarchische Darstellung der Landoberflächen-charakteristika und damit zusammenhängender Prozesse sowie eine flexiblere Konfiguration. Zusätzlich kann JSBACH4 sowohl mit ICON als auch als Teil des älteren MPI-ESM genutzt werden. Ein ganz neuer Aspekt in der Infrastruktur von JSBACH4 ist die Darstellung von heterogenen Oberflächen als ein hierarchischer Baum von Bodentypen („Kacheln“), bei dem jeder Prozess mit spezifischen Unterbäumen verbunden ist. Es besteht die Möglichkeit verschiedene Konfigurationen von variierender Komplexität für die Beschreibung der Landoberflächencharakteristik und der Prozesse, die auf den jeweiligen Kacheln laufen, zu wählen. Das erlaubt es zum Beispiel, entweder einfachere Landprozesse für kurzzeitige hochaufgelöste Simulationen zu nutzen oder komplexere Konfigurationen für längere niedriger aufgelöste Simulationen mit dem Fokus auf Landprozesse und den Kohlenstoffkreislauf. JSBACH4 hat jetzt neben den schnellen Prozessen vom Vorgängermodell (Landphysik und Biologie) auch eine erste Version des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs auf Land implementiert. Die Übertragung der verbleibenden Prozesse aus dem Vorgängermodell (dynamische Vegetation, Landnutzungsänderungen, Stickstoff) ist in Arbeit.

YAC Koppler

Um den speziellen Anforderungen des Modells ICON gerecht zu werden, wurde die Software Yet Another Coupler (YAC) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) entwickelt (Hanke et al., 2016). YAC unterstützt die unstrukturierten Gitter, die in ICON verwendet werden. Die YAC-Kopplungssoftware wird für den Austausch von Energie, Impuls, Wasser und wichtigen Spurengasen sowie der für die Berechnung der Flüsse benötigten Zustandsvariablen zwischen Ozeanmodell einerseits und Atmosphären- und Landmodell andererseits eingesetzt. Ein effektiver Koppler ermöglicht einen numerisch effizienten Datenaustausch, mit der gewünschten horizontalen Interpolation und zeitlichen Aggregation zwischen den Komponenten-modellen, was technisch anspruchsvoll ist. YAC ist ein Programmiergerüst, das es erlaubt, Algorithmen einfach hinzuzufügen oder zu entfernen, um neue Ideen und Konzepte testen zu können. Die YAC Kopplungssoftware zeichnet sich durch große Anpassungsfähigkeit aus. Sie bietet eine flexible Kopplung von physikalischen Feldern, die auf verschiedenen Gittertypen auf der Modellkugel definiert sind, ohne vorherige, festgelegte Voraussetzungen der Gitterstruktur oder Gitterelementarten. Alle unterstützten Gitter können mit jeder unterstützten Interpolation kombiniert werden.

Gekoppelte Simulationen mit ICON-ESM

Die erste Version des ICON-ESM lief mit einer Auflösung von 160 km für Atmosphäre und Land, mit 47 atmosphärischen Schichten bis zu einer Höhe von 80 km, und mit einer Auflösung von 40 km mit 64 vertikalen Schichten im Ozean. In dieser Konfiguration überdeckt jede atmosphärische Gitterbox über dem Ozean genau 16 Ozeangitterzellen (Abb. 2). Im Atmosphärenmodell wird eine fraktionelle Land-See-Maske benutzt, die direkt von der integralen Land-See-Maske des Ozeanmodells abgeleitet wird.

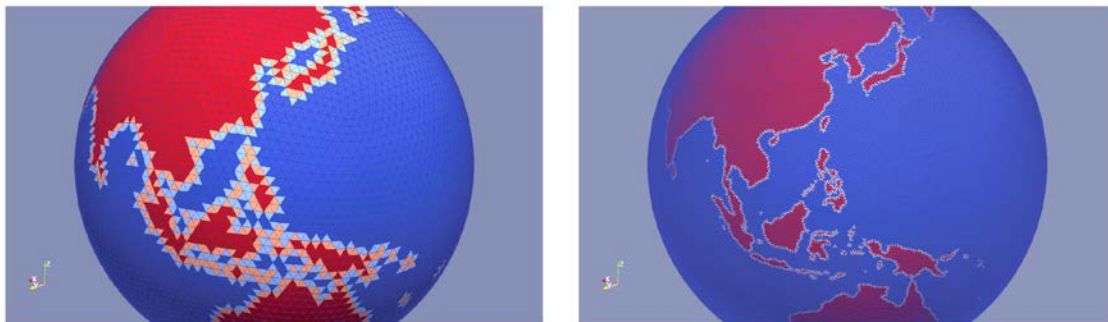


Abb. 2: Typische Gitterkonfiguration für die indonesische Region auf dem für Atmosphäre und Land benutzten 160 km Gitter (links) und dem 40 km Ozeangitter (rechts), die in ICON-ESM verwendet werden.

Erste Simulationen über mehrere Jahrhunderte unter vorindustriellen Bedingungen wurden auf dem Supercomputer „Mistral“ am DKRZ gerechnet. Die gegenwärtige Modellkonfiguration produziert 45 Simulationsjahre pro Tag auf 60 Rechenknoten. Die Simulationsergebnisse aus diesem frühen Stadium reproduzieren die Hauptmerkmale des Klimasystems und haben ähnliche Abweichungen wie das etablierte MPI-ESM in vergleichbarer Auflösung (Abb. 3).

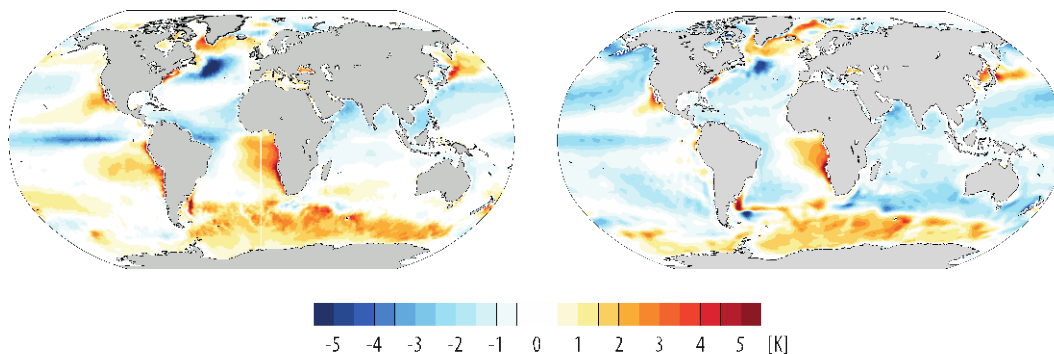


Abb. 3: Abweichungen der Wasseroberflächentemperaturen in Kelvin in vorindustriellen Kontrollsimulationen im Vergleich zur Levitus-Klimatologie: links ICON-ESM und rechts im MPI-ESM

Während einige Abweichungen von den Beobachtungsdaten (vom Ende des 20. Jahrhunderts) wie die zu warmen Auftriebszonen und der zu kalte Atlantik typisch für gekoppelte Modelle sind, werden andere wie der übermäßig warme Südliche Ozean und das damit verbundene Ausbleiben der Bildung des Antarktischen Bodenwassers oder des Meereises im Sommer weiterhin im speziellen ICON-Setup untersucht.

Das Ziel für die Zukunft sind hochauflösende gekoppelte Konfigurationen sowohl für die Atmosphäre als auch für den Ozean sowie eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit mit einer Durchsatzsteigerung von einem Faktor zwei bis vier. Für den wirbelauflösenden Ozean soll ein Gitter eingesetzt werden, auf dem sich die Auflösung am lokalen Rossby-Radius in beiden Hemisphären skaliert. Andere Konfigurationen sollen regionale wirbelauflösende Gitter im Ozean und konvektionsauflösende Gitter in der Atmosphäre erhalten, um die Wechselwirkungen zwischen Wolken und Zirkulation sowie die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre im tropischen Atlantik zu untersuchen. Die Flexibilität und Effizienz der Rechenleistung des ICON-Modellierungsrahmen öffnet neue Horizonte für die Wissenschaftler.

Literatur:

Giorgetta, M. A., et al., 2017: The ICON atmosphere model with MPI physics. Part 1: Model description, in preparation.

Crueger, T., et al., 2017: The ICON atmosphere model with MPI physics. Part 2: Model evaluation, in preparation.

Korn, P., and S. Danilov, 2017a: Elementary Dispersion analysis of some mimetic discretizations on triangular C-grid. *J. Comp. Phys.*, 330, 156-172.

Korn, P., 2017b: Formulation of an Unstructured Grid Model for Global Ocean Dynamics, *J. Comp. Phys.*, 339, 525-552.

Hanke, M., R. Redler, T. Holfeld, and M. Yastremsky, 2016: YAC 1.2.0: new aspects for coupling software in Earth system modeling. *Geosci. Model Dev.*, 9, 2755-2769.

Kontakt:

Dr. Marco Giorgetta
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 358
E-Mail: marco.giorgetta@mpimet.mpg.de



Dr. Peter Korn
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 470
E-Mail: peter.korn@mpimet.mpg.de

Dr. Christian Reick
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Tel.: 040 41173 117
E-Mail: christian.reick@mpimet.mpg.de