

Abschlussbericht: MiKlip–Projekt TORUS

Towards regionally focused modelling of decadal climate predictions

Dörthe Handorf, Dmitry Sidorenko, Thomas Rackow, Dirk Barbi,
Wolfgang Dorn, Helge Goessling, Tido Semmler, Sergey Danilov,
Stephan Juricke¹, Thomas Jung, Wolfgang Hiller, Klaus Dethloff

Zuwendungsempfänger: Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung Postfach 12 01 61 27515 Bremerhaven	Förderkennzeichen: 01LP1111A
Vorhabenbezeichnung: MiKlip-Projekt: TORUS – Towards regionally focused modelling of decadal climate predictions	
Laufzeit des Vorhabens: 01. 11. 2011 – 31. 10. 2015	
Ansprechpartnerin: Dr. Dörthe Handorf, email: doerthe.handorf@awi.de, Tel.: 0331/288 2131	

Dieses Fördervorhaben wurde mit Mitteln des BMBF im Rahmen des Forschungsprogrammes MiKlip gefördert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



¹ jetziger Arbeitsort: Atmospheric, Oceanic & Planetary Physics, University of Oxford, Oxford, UK

I Aufgabenstellung und Planung von TORUS, Stand der Forschung zu Beginn des Vorhabens

I.1 Aufgabenstellung von TORUS

Das wissenschaftliche Hauptziel des Projektes TORUS lag auf der Untersuchung der Rolle der arktischen Schlüsselregion für ein verbessertes Verständnis von Klimavariabilität und potentieller Vorhersagbarkeit auf dekadischen Zeitskalen. In engem Zusammenhang damit wurde der Frage nachgegangen, wie sich eine erhöhte Auflösung der arktischen Region in Klimamodellen und eine alternative Formulierung der Ozeandynamik auf die Leistungsfähigkeit von Klimamodellen hinsichtlich der Darstellung dekadischer Klimavariabilität und damit auf die Güte von dekadischen Vorhersagen auswirken kann.

Um diese Zielstellungen zu erreichen, sollte im Projekt ein Modellsystem mit einer, im Vergleich zum MiKlip-Modellsystem, alternativen Formulierung der Ozeandynamik entwickelt werden, das die explizite Auflösung relevanter meso- und klein-skaliger Prozesse in den Schlüsselregionen der hohen Breiten erlaubt. Im Detail zielte TORUS auf folgende spezifische Aufgabenstellungen ab:

(A) Durch die Kopplung des am MPI entwickelten Atmosphärenmodells ECHAM5/6 mit dem am AWI entwickelten Finite-Elemente Ozean-Meereismodell FESOM sollte ein funktionierendes und validiertes Modellsystem mit unstrukturiertem Gitter und mit einer alternativen Formulierung der Ozeandynamik bereitgestellt werden, das eine regional fokussierte Simulation erlaubt.

(B) Sensitivitätsstudien bezüglich des Einflusses einer regional verfeinerten Darstellung der Arktis auf das Modellklima und die Modellvariabilität und dekadische Vorhersagbarkeit sollten durchgeführt werden.

(C) Mechanismen dekadischer Klimavariabilität sollten untersucht werden, insbesondere dynamische Prozesse in der Arktis, die Einfluss auf die großskaligen atmosphärischen und ozeanischen Zirkulationsmuster und damit auf dekadische Variabilität und Vorhersagbarkeit haben.

(D) Mit dem neu zu entwickelnden Modellsystem sollte untersucht werden, wie groß das Potential einer regional verbesserten Modellierung, insbesondere des Meereises, für eine Verbesserung der Simulation von mittlerem Klima und dekadischer Klimavariabilität insbesondere über der Arktis ist.

Das Projekt TORUS war im MiKlip Modul B „Prozesse und Modellierung“ angesiedelt.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

Das Projekt wurde vor dem Hintergrund der arktischen Verstärkung der globalen Erwärmung entwickelt. Durch die damit verbundenen Änderungen im arktischen Klimasystem, insbesondere durch den dramatischen Rückgang des Meereises, kann die großskalige Zirkulation in mittleren und niederen Breiten und damit die dekadische Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit beeinflusst werden. Deshalb kann erwartet werden, dass sich eine verbesserte Darstellung arktischer Klimaprozesse in Klimamodellen positiv auf die Güte von dekadischen Vorhersagen über Europa auswirkt. Zudem gab es zu Projektbeginn weltweit noch kein gekoppeltes Modellsystem, das für die Meereis-Ozean-Modellkomponente ein unstrukturiertes Gitter verwendete und somit regional verfeinerte Auflösungen in dieser Modellkomponente ermöglichte.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde wie geplant über den gesamten Zeitraum (1.11.2011 - 31.10.2015) durchgeführt. Der Verlauf des Projektes entsprach der geplanten Aufteilung der Forschungsaktivitäten in 3 Arbeitspakete (WP). Die Koordination und das Management des Projekts erfolgte durch die Koordinatorin Dörthe Handorf.

Um die wissenschaftlichen Fragestellungen aus I.1 zu untersuchen, wurde in WP1 das gekoppelte TORUS-Modellsystem entwickelt und validiert. Das TORUS-Modellsystem besteht aus dem am AWI entwickelten Finite Element Sea Ice Ocean Model FESOM (Wang et al., 2008) und dem Atmosphärenmodell ECHAM6 in der gleichen Konfiguration wie im MiKlip-Modellsystem. Da zu Projektbeginn ECHAM6 noch nicht offiziell freigegeben war, begannen die Projektarbeiten mit der Kopplung des Atmosphärenmodells ECHAM5 an FESOM mit Hilfe der Kopplungssoftware OASIS4. Diese Arbeiten führten zu einem stabilen System. Da jedoch im MiKlip-Rahmen das Atmosphärenmodell ECHAM6 verwendet werden sollte, wurden die Entwicklungsarbeiten an ECHAM5-FESOM beendet und nach dem offiziellen Release von ECHAM6 seit Mai 2012, unter Verwendung der Kopplungssoftware OASIS3-MCT (Release im September 2012) auf die Kopplung von ECHAM6 an FESOM übertragen.

Das gekoppelte Modellsystem mit regionaler Verfeinerung, insbesondere über der Arktis, (Modellgitter R1) wurde validiert und stand gegen Ende des zweiten Projektjahres zur Durchführung verschiedener Langzeit- und Sensitivitätssimulationen zur Verfügung. In der zweiten Phase von MiKlip wurde eine Modellversion mit regionaler und kleinskaliger Verfeinerung über der Arktis und dem Nordatlantik (Modellgitter R2) implementiert und validiert.

In WP2 wurde das neue Modellsystem erfolgreich für verschiedene wissenschaftliche Anwendungen eingesetzt, um Prozesse und Mechanismen zu untersuchen, die Einfluss auf dekadische Variabilität und potentielle Vorhersagbarkeit auf interannualen bis dekadischen Zeitskalen haben. Dazu wurden zum einen verschiedene Langzeit-Simulationen des Modellsystems durchgeführt und analysiert. Zum anderen wurden umfangreiche Sensitivitätsstudien zu subgrid-skaligen Parametrisierungen in den Polargebieten durchgeführt. Um eine verbesserte Simulation der Atmosphäre-Meereis-Rückkopplung in ECHAM6-FESOM zu erzielen, wurde ein verbessertes thermodynamisches Schema für das Eiswachstum implementiert. In enger Zusammenarbeit mit dem MiKlip-Projekt SPARCS (Leitung Dr. Christof Lüpkes) wurde die in SPARCS entwickelte Hierarchie von Parametrisierungen für Impuls- und Wärmetransferkoeffizienten für die Transporte in der atmosphärischen Grenzschicht über einer unterbrochenen Meereisbedeckung in ECHAM6-FESOM implementiert und deren Einfluss auf die Simulation der großskaligen atmosphärischen Zirkulation und Klimavariabilität analysiert.

Die Arbeiten in WP3 konzentrierten sich auf Studien zur potentiellen Vorhersagbarkeit. Dies umfasste die Entwicklung einer Skript-Infrastruktur für die Durchführung umfangreicher Ensemble-Experimente und die Implementierung verschiedener Methoden zur Erzeugung der notwendigen gestörten Anfangszustände in Zusammenarbeit mit dem MiKlip-Projekt MODINI. Somit konnten Sensitivitätsstudien und Ensemblesimulationen zum Einfluss einer stochastischen Meereisparameterisierung durchgeführt werden. Die Sensitivitätsstudien belegen eine Beschleunigung der arktischen und antarktischen Meereisdrift im gekoppelten stochastischen System im Vergleich zu einer deterministischen multidekadischen Referenzsimulation.

Nach Abschluss des Projekts steht erstmals ein gekoppeltes Modellsystem zur Verfügung, das für die Meereis-Ozean-Modellkomponente ein unstrukturiertes Gitter verwendet, und somit regional verfeinerte Auflösungen in dieser Modellkomponente ermöglicht. Diese Entwicklung ist ein wichtiger Schritt für die Entwicklung von gekoppelten Multiskalen-Klimamodellen. Die wissenschaftlichen Anwendungen von ECHAM6-FESOM im Rahmen von TORUS zeigten das Potential dieser Modellkonfiguration für eine verbesserte Darstellung von dekadischer Variabilität und Vorhersagbarkeit.

I.4 Stand der Forschung zu Projektbeginn

In den Jahren vor Projektbeginn zeigte sich ein immer stärkerer Bedarf an verlässlichen Aussagen zu Klimaentwicklungen im Bereich von Jahren bis hin zu Dekaden, da Planungen in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft in der Regel in dieser Größenordnung liegen. Deshalb sollte im Rahmen der Fördermaßnahme „Mittelfristige Klimaprognosen“ (MiKlip) ein gekoppeltes Modellsystem entwickelt werden,

das auf diesen Zeitskalen verlässliche Aussagen zur Klimaentwicklung geben kann. Im Projekt TORUS wurde sich dabei der Herausforderung gestellt, wie in einem gekoppelten Modellsystem eine verbesserte Beschreibung der für die mittelfristige Klimaprognose entscheidenden Prozesse, insbesondere über der Arktis, erzielt werden kann.

Hawkins und Sutton (2009) beschrieben, dass die dominierenden Quellen für Unsicherheiten dekadischer Klimavorhersagen Modellunsicherheiten und interne Klimavariabilität sind. Dies unterstreicht die Bedeutung einer verbesserten Darstellung der Anfangsbedingungen im System Ozean-Meereis und die Notwendigkeit einer verbesserten Darstellung relevanter Klimaprozesse in gekoppelten Modellen.

Aufgrund der internen nichtlinearen Dynamik im Klimasystem bilden sich verschiedene niederfrequente, großskalige Variabilitätsmuster heraus, deren räumliche und zeitliche Strukturen von gegenwärtigen Klimamodellen nicht hinreichend gut simuliert werden können (Handorf und Dethloff, 2012). Das Verständnis der den großskaligen Variabilitätsmustern zugrunde liegenden Mechanismen, deren korrekte Simulation und die Wechselwirkungen mit den externen Antriebsfaktoren sind grundlegend für dekadische Vorhersagen.

Die Arktis ist eine Schlüsselregion im globalen Klimasystem. Insbesondere der im Zusammenhang mit der verstärkten arktischen Erwärmung stehende dramatische Rückgang des Meereises kann die großskaligen atmosphärischen Zirkulationsmuster und damit das Wetter und Klima in Europa beeinflussen. Zu Projektbeginn stand dieses Thema noch nicht im Fokus der internationalen Forschung. Neben Studien, wie Änderungen atmosphärischer Telekonnektionsmuster, z. B. der Nordatlantischen Oszillation (NAO), das arktische Meereis beeinflussen können (Hilmer und Jung, 2000), gab es bereits Untersuchungen von z. B. Deser et al. (2004, 2007), die einen Einfluss des arktischen Meereises auf die Ausprägung von atmosphärischen Telekonnektionsmustern, insbesondere der NAO postulierten. Dethloff et al. (2006) zeigten in einer Langzeitsimulation mit dem gekoppelten Modell ECHAM4-HOPE-G, dass der Einfluss von Meereis und Schneebedeckung auf die atmosphärische Zirkulation über dem Nordpazifik stärker ist als über dem Nordatlantik. In Modellexperimenten mit einem atmosphärischen Zirkulationsmodell wiesen Honda et al. (2009) nach, dass Meereisanomalien im November über der Barents-Kara See einen Rossby-Wellenzug im Frühwinter triggern, der das Sibirische Hoch verstärkt und zu kälteren eurasischen Wintern beiträgt. Auf der Basis von Reanalysedaten zeigten Jaiser et al. (2012), dass die geänderte Eisbedeckung der Arktis im Spätsommer über Wechselwirkungen zwischen synoptisch-skaligen Wirbeln und planetaren atmosphärischen Wellen die großskalige Zirkulation in mittleren Breiten im Winter derart ändern kann (negative Phase der Arktischen Oszillation), dass kalte Winter häufiger auftreten können.

Mittlerweile liegen eine Vielzahl von Veröffentlichungen zu Wechselwirkungen zwischen arktischen Klimaänderungen und dem Wetter und Klima in mittleren Breiten vor, darunter einige Überblicksartikel, z. B. Cohen et al. (2014). Ein verbessertes Verständnis der zugrunde liegenden dynamischen Verbindungswege birgt somit Potential auch für verbesserte dekadische Vorhersagen. Um dieses Potential nutzen zu können, ist eine adäquate Darstellung der fundamentalen Prozesse im Ozean-Meereissystem in hohen Breiten erforderlich. Insbesondere sind dies die meridionale Umwälzzirkulation im Atlantik, die Wirbel und Strömungen im Arktischen Ozean und die Meereisverteilung einschließlich von Polynias. Diese Prozesse umfassen Wechselwirkungen zwischen planetaren, Meso- und kleinen Skalen.

Um die genannten Multiskalenprozesse im Ozean-Meereissystem gut darzustellen, waren die zumeist angewendeten globalen Modelle mit uniformer horizontaler Auflösung nicht geeignet. Zu Projektbeginn stand das am AWI entwickelte Ozean-Meereismodell FESOM (Danilov et al., 2004; Wang et al., 2008; Timmermann et al., 2009) zur Verfügung. Der unstrukturierte Gitteransatz erlaubte es, lokal hoch aufgelöste Gitter für Schlüsselregionen zu erzeugen, so dass es möglich war, wichtige meso- und kleinskalige Prozesse aufzulösen, die zuvor in globalen Modellen nicht simuliert wurden. FESOM erlaubt eine glatte Darstellung von Küstenlinien und Bodentopographie sowie eine einfache Gittererzeugung für beliebige Gebiete, z. B. die Arktis. Zu Projektbeginn wurde FESOM im ungekoppelten Modus mit vorgeschriebenem atmosphärischen Antrieb benutzt, um dem Einfluss der regionalen Ver-

feinerung in ausgewählten Regionen wie z. B. der westlichen Ross-See (Wang et al., 2010) oder dem kanadischen Archipel auf die globale Ozeanzirkulation zu untersuchen.

Am AWI liefen zu Projektbeginn im Rahmen des BMBF-finanzierten Projektes ScaLES bereits erste Vorstudien zur technischen Implementierung eines parallelen gekoppelten Modellsystems, bestehend aus den Komponenten FESOM (Ozean-Meereismodell), ECHAM5.4 (Atmosphärenmodell) und OASIS4 (Kopplungssoftware). Da OASIS4 nicht für die Behandlung unstrukturierter Gitter entwickelt wurde (Redler et al., 2010), traten technische Probleme auf. Durch die Einführung eines strukturierten Austauschgitters auf der FESOM-Seite und entsprechende Interpolation der Daten wurde eine prinzipielle Lösungsmöglichkeit aufgezeigt. Ausgehend von diesen Arbeiten wurde im Rahmen von TORUS das gekoppelte Modellsystem entwickelt.

Ein kritischer Punkt bei der Anwendung von Modellen mit unstrukturierten Gittern wie FESOM ist die numerische Effizienz. Die irregulären Datenstrukturen und sehr dünn besetzte Matrizen erfordern passende Optimierungen und spezielle Lösertechniken. Die Vorarbeiten, auf denen im Projekt aufgebaut wurde, umfassen die am AWI entwickelte numerische universelle Löser-Bibliothek FoSSi (Frickenhaus et al., 2005) und die parallele Löser-Bibliothek pARMS (Li et al., 2003) mit einem speziellen Fokus auf Gebietszerlegungstechniken, deren Anwendung für die Weiterentwicklung von FESOM notwendig war.

Zitierte Literatur

- Cohen, J., J. A. Screen, J. C. Furtado, M. Barlow, D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff, D. Entekhabi, J. Overland und J. Jones (2014): Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nature Geosci.*, 75, 627–637, doi: [10.1038/ngeo2234](https://doi.org/10.1038/ngeo2234).
- Danilov, S., G. Kivman und J. Schröter (2004): A finite-element ocean model: principles and evaluation, *Ocean Model.*, 6, 125–150, doi: [10.1016/j.ocemod.2013.10.005](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.10.005).
- Deser, C., G. Magnusdottir, R. Saravanan und A. Phillips (2004): The effects of North Atlantic SST and sea ice anomalies on the winter circulation in CCM3. Part II: Direct and indirect components of the response, *J. Climate*, 17, 877–889, doi: [10.1175/1520-0442\(2004\)017<0877:TEONAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0877:TEONAS>2.0.CO;2).
- Deser, C., R. A. Thomas und S. Peng (2007): The transient atmospheric circulation response to North Atlantic SST and sea ice anomalies, *J. Climate*, 20, 4751–4767, doi: [10.1175/JCLI4278.1](https://doi.org/10.1175/JCLI4278.1).
- Dethloff, K., A. Rinke, A. Benkel, M. Køltzow, E. Sokolova, S. K. Saha, D. Handorf, W. Dorn, B. Rockel, H. von Storch, J. E. Haugen, L. P. Røed, E. Roeckner, J. H. Christensen und M. Stendel (2006): A dynamical link between the Arctic and the global climate system, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03703, doi: [10.1029/2005GL025245](https://doi.org/10.1029/2005GL025245).
- Frickenhaus, S., W. Hiller und M. Best (2005): The family of simplified solver interfaces for the rapid development of parallel numerical atmosphere and ocean models, *Ocean Model.*, 10, 185–191, doi: [10.1016/j.ocemod.2004.06.004](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.06.004).
- Handorf, D. und K. Dethloff (2012): How well do state-of-the-art atmosphere-ocean general circulation models reproduce atmospheric teleconnection patterns?, *Tellus A*, 64, 19777, doi: [10.3402/tellusa.v64i0.19777](https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.19777).
- Hawkins, E. und R. Sutton (2009): The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90, 1095–1107, doi: [10.1175/2009BAMS2607.1](https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1).
- Hilmer, M. und T. Jung (2000): Evidence for a recent change in the link between the North Atlantic Oscillation and Arctic sea ice export, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 989–992, doi: [10.1029/1999GL010944](https://doi.org/10.1029/1999GL010944).
- Honda, M., J. Inoue und S. Yamane (2009): Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L08707, doi: [10.1029/2008GL037079](https://doi.org/10.1029/2008GL037079).
- Jaiser, R., K. Dethloff, D. Handorf, A. Rinke und J. Cohen (2012): Planetary- and baroclinic-scale feedbacks between atmospheric and sea ice cover changes in the Arctic, *Tellus A*, 64, 11595, doi: [10.3402/tellusa.v64i0.11595](https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.11595).

- Li, Z., Y. Saad und M. Sosonkina (2003): pARMS: a parallel version of the algebraic recursive multilevel solver, *Numer. Lin. Algebra Appl.*, 10, 485–509, doi: [10.1002/nla.325](https://doi.org/10.1002/nla.325).
- Redler, R., S. Valcke und H. Ritzdorf (2010): OASIS4 - A coupling software for next generation earth system modelling, *Geosci. Model Dev.*, 3, 87–104, doi: [10.5194/gmd-3-87-2010](https://doi.org/10.5194/gmd-3-87-2010).
- Timmermann, R., S. Danilov, J. Schröter, C. Böning, D. Sidorenko und K. Rollenhagen (2009): Ocean circulation and sea ice distribution in a finite element global sea ice-ocean model, *Ocean Model.*, 27, 114–129, doi: [10.1016/j.ocemod.2008.10.009](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2008.10.009).
- Wang, Q., S. Danilov und J. Schröter (2008): Finite element ocean circulation model based on triangular prismatic elements, with application in studying the effect of topography representation, *J. Geophys. Res.*, 113, C05015, doi: [10.1029/2007JC004482](https://doi.org/10.1029/2007JC004482).
- Wang, Q., S. Danilov, H. H. Hellmer und J. Schröter (2010): Overflow dynamics and bottom water formation in the western Ross Sea: Influence of tides, *J. Geophys. Res.*, 115, C10054, doi: [10.1029/2010JC006189](https://doi.org/10.1029/2010JC006189).

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Fördermaßnahme MiKlip hat das Projekt TORUS eng mit dem Projekt SPARCS (Modul B, Leitung Dr. Christof Lüpkes) zusammengearbeitet. Es wurden die in SPARCS entwickelten verbesserten Parametrisierungen für turbulente Transporte in der atmosphärischen Grenzschicht über Meereis in ECHAM6-FESOM implementiert und getestet. In Zusammenarbeit mit dem Projekt MODINI (Leitung Prof. Dr. Rüdiger Gerdes und Prof. Dr. Richard J. Greatbatch) wurden die Anwendungsmöglichkeiten von alternativen Methoden der Initialisierung von gekoppelten Klimamodellen für ECHAM6-FESOM untersucht.

Auf internationaler Ebene hat das Projekt von der Kooperation mit dem Projekt APPOSITE (Predictability and Prediction on Seasonal to Interannual Timescales, Leitung Dr. Ed Hawkins, Universität Reading, UK) und dem ERA-NET RUS Projekt ACPA (Arctic Climate Processes Linked Through the Circulation of the Atmosphere, Koordinator Prof. Dr. Stefan Brönnimann, Universität of Bern, Schweiz) profitiert.

II Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und Nutzen des Projekts TORUS

II.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Entwicklung und Optimierung des TORUS-Modellsystems

Im Rahmen des MiKlip-Projekts TORUS wurde das neue gekoppelte Modellsystem ECHAM6-FESOM entwickelt (Milestone M1). ECHAM6-FESOM ist das weltweit erste gekoppelte Klimamodell, das eine Ozean-Komponente mit unstrukturiertem Gitter beinhaltet.

Da zu Projektbeginn noch kein offizielles Release von ECHAM6 zur Verfügung stand, wurde im Jahr 2011 die etablierte Atmosphärenmodellversion ECHAM5.4 und das am AWI entwickelte Finite Element Sea Ice Ocean Model FESOM technisch gekoppelt und physikalisch validiert. Die Kopplung erfolgte dabei mit dem im Rahmen des BMBF-Projekts ScaleS an unstrukturierte Gitter angepassten Koppler OASIS4, zunächst über ein strukturiertes Zwischengitter, da unstrukturierte Gitter vom OASIS4-Koppler nicht unterstützt wurden. Es konnte ein stabiles System implementiert werden, mit dem Kontrollsimulationen mit präindustriellem Antrieb durchgeführt wurden.

Da jedoch im Rahmen von MiKlip das Atmosphärenmodell ECHAM6 verwendet werden sollte, wurden die Entwicklungsarbeiten an ECHAM5-FESOM beendet und nach dem offiziellen Release von ECHAM6 seit Mai 2012 auf die Kopplung von ECHAM6.1 an FESOM übertragen. Weiterentwicklungen des ECHAM-Modells (zusätzliche Physik, Fehlerbehebung) während der Laufzeit von TORUS haben zu einer verbesserten Version 6.3 geführt. Um von diesen Fortschritten zu profitieren, aber auch um die Vergleichbarkeit zu anderen MiKlip-Läufen zu gewährleisten, wurde im Mai 2015 der Wechsel von ECHAM6.1 auf ECHAM6.3 vollzogen. Das resultierende Modellsystem, das nun unter dem Namen AWI-CM (Alfred Wegener Institute - Climate Model) geführt wird, soll unter anderem ab 2016 für Simulationen im Rahmen des Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) eingesetzt werden.

Für die Kopplungen der ECHAM6-Versionen an FESOM wurde die Kopplungssoftware OASIS3-MCT (Release im September 2012) verwendet, da diese Software ermöglicht, effizienter mit hohen Anzahlen von Prozessoren parallel zu rechnen, als es mit OASIS4 der Fall war, und zudem CERFACS die Unterstützung des OASIS4-Kopplers wegen unlösbarer Probleme mit der Performance bei größeren Modellgittern eingestellt hatte. Der neue Koppler OASIS3-MCT bietet nicht nur Performancevorteile, die sich insbesondere bei umfangreichen Langzeit- und Ensemblesimulationen positiv auswirken, sondern unterstützt auch unstrukturierte Gitter.

Für die an ECHAM gekoppelte Version von FESOM wurde ein weiterentwickeltes thermodynamisches Eiswachstumsschema (Dorn et al., 2009) ins FESOM integriert, das die von ECHAM über dem offenen Ozean und dem eisbedeckten Ozean berechneten Wärme- und Strahlungsflüsse in getrennten Energiebilanzen verarbeitet. Dies hat zu einer verbesserten Simulation der Rückkopplungen zwischen Atmosphäre und Meereis in ECHAM6-FESOM geführt, wodurch insbesondere eine realistischere Meereisausdehnung im Sommer simuliert wird; doch auch die simulierte Eisdickenverteilung liegt dadurch deutlich näher an beobachtungsbasierten Daten.

Bis Ende 2012 wurde die technische Entwicklung des neuen gekoppelten Modellsystems ECHAM6-FESOM mit der Kopplungssoftware OASIS3-MCT erfolgreich abgeschlossen (Milestone M1), sodass seit Ende des Jahres 2012 Validierungsläufe über Jahrzehnte bis zu Jahrhunderten mit ECHAM6-FESOM durchgeführt und ausgewertet werden konnten (Milestone M2).

Während der gesamten Laufzeit des Projekts wurde kontinuierlich an der Optimierung des gekoppelten Systems in Hinblick auf Performance und Skalierbarkeit gearbeitet. Die rechentechnische Performance des gekoppelten Modells wurde wiederholt mit diversen Tracing- und Profilingtools gemessen, um auf diese Weise optimale Prozessorzahlen für die Ozean- und Atmosphärenkomponenten zu bestimmen.

Als einer der größten technischen Fortschritte wurde das reguläre Austauschgitter, das bisher zur Kopplung zwischen ECHAM6 und FESOM nötig war, entfernt. Der Austausch erfolgt nun direkt mittels OASIS3-MCT zwischen dem unstrukturierten FESOM-Gitter und dem quasi-regulären ECHAM6-Gitter. Zudem wurde die Interpolation verbessert und die Kopplung nun komplett parallel implementiert, was einen Vorteil bei der Verwendung einer hohen Zahl von Prozessoren darstellt. Außerdem wurde ein „collective transfer“ der Kopplungsfelder konfiguriert und getestet, bei dem die Kopplungsfelder nun nicht mehr einzeln, sondern gesammelt zwischen den Modellen übertragen werden. Insgesamt resultieren diese Änderungen in einem deutlichen Performancegewinn (etwa 30 %) des gesamten gekoppelten Modells.

Eine weitere Optimierung betrifft den Löser. Hier wurde das ursprünglich verwendete Löserpaket PETSc durch das Paket pARMS (<http://www-users.cs.umn.edu/~saad/software/pARMS/>) mit eigenen Erweiterungen ersetzt. Insgesamt konnte so die Rechenzeit im Löser um ca. 10 % reduziert werden und zugleich die Weitergabe und Installation von FESOM deutlich vereinfacht werden. Mit steigendem Parallelisierungsgrad wird die bisher rein serielle Ausgabe zunehmend zeitkritisch. Hier wurden erste Schritte zur Optimierung gegangen und die Zeit für einen Ausgabeschritt um ca. 40 % gesenkt.

Bei der Parallelisierung von FESOM mussten ursprünglich Kompromisse bei der Lastbalance eingegan-

gen werden. Der verwendete Partitionierungsalgorithmus konnte nicht alle Knoten des Modellgitters gleichmäßig auf die Prozessoren verteilen. Im Rahmen von TORUS wurde die Partitionierung mit der aktuellsten Version 5.1 von Metis optimiert und gleichzeitig die Qualität der Partitionierung verbessert. Je nach Gittergröße, Variation in der Anzahl der vertikalen Schichten und Prozessorzahl ist ein Modelllauf mit der verbesserten Partitionierung ca. 20 % schneller als zuvor.

Gitterverfeinerungen im TORUS-Modellsystem

Im TORUS-Modellsystem wird die Atmosphärenmodellkomponente ECHAM6 in einer Standardkonfiguration mit der in MiKlip vereinbarten Auflösung T63/L47 betrieben (entspricht der LR-Version von MPI-ESM). Auf Grund der Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Ozeanmodell FESOM ist es möglich, globale Ozean-Simulationen durchzuführen, in denen die räumliche Auflösung in bestimmten Regionen entsprechend der wissenschaftlichen Fragestellung besonders hoch gewählt wird. Zunächst wurden verschiedene Gitterkonfigurationen in FESOM getestet, um letztlich eine Modellversion mit geeigneter regionaler Gitterverfeinerung zu entwickeln (Milestone M5). Dieses Referenzgitter des gekoppelten Modellsystems ECHAM6-FESOM verwendet ein Gitter mit einer nominalen Auflösung von 150 km im offenen Ozean, das graduell auf bis zu 20 km im nördlichen Nordatlantik, im arktischen Ozean und in den Tropen verfeinert ist (Gitter R1). Das Gitter R1 ist in Abb. ?? (links) dargestellt.

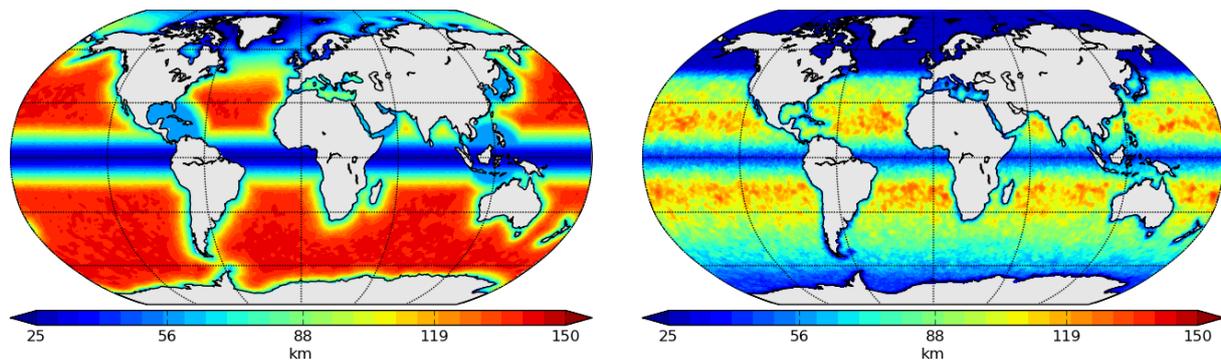


Abb. 1: Ozean-Gitter die zurzeit in ECHAM6-FESOM verwendet werden (links: Gitter R1; rechts: Gitter R2).

Ein wichtiger Punkt in TORUS war die Analyse der Auswirkungen regionaler und kleinskaliger Verfeinerung des Ozeangitters auf die Simulationsergebnisse (Milestone M6). Diesbezüglich wurde eine verbesserte Modellkonfiguration mit einem allgemein höher aufgelösten Ozeangitter erstellt. Dazu wurde eine FESOM-Konfiguration auf einem neuen Gitter (R2) gewählt, die bereits im Rahmen der Coordinated Ocean Reference Experiments Phase 2 (CORE2) mit anderen Ozeanmodellen und Beobachtungen verglichen wurde (Griffies et al., 2014; Danabasoglu et al., 2014).

Die Auflösung des R2-Gitters ist in Abb. ?? (rechts) dargestellt. Im Vergleich zum R1-Referenzgitter weist das Gitter eine höhere Auflösung im nördlichen Nordatlantik, im kanadischen arktischen Archipel, in der Labradorsee sowie in der Arktis im Allgemeinen auf. Die Auflösung im Umfeld der Antarktis wurde ebenfalls verfeinert.

Mittleres Klima und Klimavariabilität im TORUS-Modellsystem mit regionaler Gitterverfeinerung (Gitter R1)

Zunächst wurde mit dem TORUS-Modellsystem auf dem Modellgitter R1 (ECHAM6-FESOM-R1) im Jahr 2013 ein 1500-jährigen Kontrolllauf mit vorgeschriebenen konstanten Treibhausgaskonzentrationen für das Jahr 1990 durchgeführt.

Die Validierung des mittleren Klimazustands und dessen Variabilität (Milestones M3 und M5) zeigte, dass die R1-Konfiguration ähnlich gute Ergebnisse erzielt wie andere gängige Klimamodelle aus CMIP5. Jedoch zeigt ECHAM6-FESOM auch ähnliche Probleme, die typisch für Modelle dieser Komplexität sind. Dies sind beispielsweise eine reduzierte Tiefenkonvektion in der Labradorsee verbunden mit sporadischer Eisbedeckung in dieser Region (Abb. ??), positive Temperatur- und Salztrends im tiefen Ozean, insbesondere im Nordatlantik, die mit einem negativem Trend der potentiellen Dichte einhergehen, sowie eine erhöhte Eisbedeckung im westlichen Nordmeer und in der Barentssee (Abb. ??). Trotz dieser Defizite zeigt ein Vergleich mit anderen Klimamodellen für heutige Bedingungen eine realistische Eisdickenverteilung in ECHAM6-FESOM-R1 (vgl. Abb. S7 von Tietsche et al., 2014). Die Ergebnisse wurden unter anderem in zwei wissenschaftlichen Veröffentlichungen beschrieben und diskutiert (Sidorenko et al., 2015; Rackow et al., 2016)

Die Anwendung von objektiven Performance-Indizes bestätigt, dass ECHAM6-FESOM die mittleren Meereis- und atmosphärischen Felder mindestens so gut wie die besten CMIP5-Modelle reproduzieren kann. Der originale Performance-Index nach Reichler und Kim (2008) wurde durch die Einbindung neuer Beobachtungsdaten und die Anwendung des mittleren absoluten Fehlers bezüglich der Beobachtungsdaten modifiziert. Der mittlere absolute Fehler wurde mit dem Durchschnittswert des mittleren absoluten Fehlers von 5 führenden CMIP5-Modellen (MPI-ESM-LR, HadGEM2, CCSM4, GFDL-CM3, MIROC-ESM) normiert. Zusätzlich wurden 6 verschiedene Regionen der Erde betrachtet. Die entsprechenden Index-Werte sind in Tab. ?? aufgeführt und wurden in der Veröffentlichung von Sidorenko et al. (2015) diskutiert. Werte kleiner eins zeigen an, dass das Modell die beobachteten atmosphärischen und Meereis-Felder besser als der Durchschnitt der 5 führenden CMIP5-Modelle reproduziert. Die Tabelle zeigt, dass dies sowohl für ECHAM6-FESOM-R1, als auch für MPI-ESM-LR der Fall ist.

	Antarktis 90–60°S	mittlere Breiten SH 60–30°S	innere Tropen 15°S–15°N	Tropen 30°S–30°N	mittlere Breiten NH 30–60°N	Arktis 60–90°N
ECHAM6-FESOM-R1 (1990er Antrieb)	0.93	0.88	0.87	0.84	0.84	0.94
MPI-ESM-LR (historical) 1950–2050	0.98	0.89	0.92	0.89	0.90	0.88

Tab. 1: Performance-Indizes für mittlere Größen für 6 verschiedene Regionen der Erde. Daten aus Sidorenko et al. (2015).

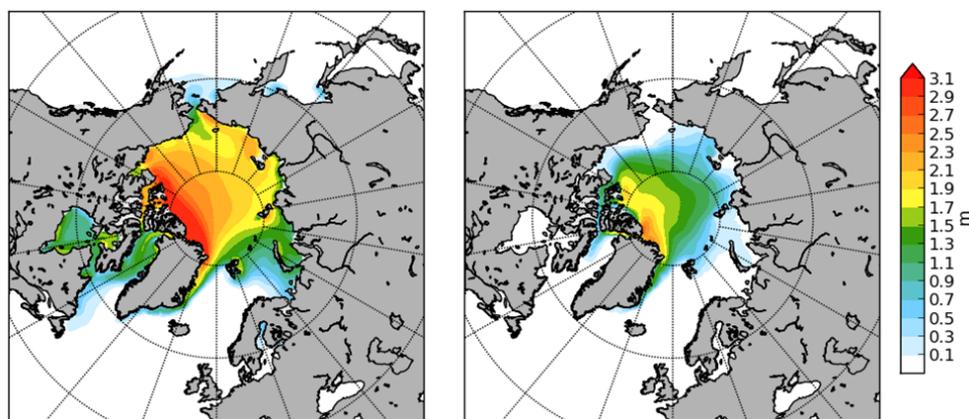


Abb. 2: Klimatologie der arktischen Meereisdicke [m], simuliert mit dem R1-Referenzgitter bei konstantem 1990er Antrieb, im März (links) und September (rechts). Abbildung aus Sidorenko et al. (2015).

Zur Analyse der Variabilität generell und wichtiger Variabilitätsmuster speziell wurde im Projekt das Konzept der Performance Indizes auf die Variabilität erweitert. Dabei werden anstelle der Mittelwerte die Standardabweichungen zwischenjähriger Schwankungen von simulierten Größen mit Beobachtungen verglichen (siehe Ergebnisse in Tab. ??). Desweiteren wurde eine Vielzahl an Algorithmen implementiert, um weit verbreitete, in der Literatur beschriebene Analysetechniken, aber auch eigene Analysemethoden auf die Simulationsergebnisse von ECHAM6-FESOM anzuwenden. So wurde beispielsweise eine innovative Methode zur Trendbereinigung eingesetzt, um den langen Kontrolllauf trotz der verbleibenden Modelldrift bezüglich der internen Klimavariabilität zu untersuchen. Es handelt sich um ein exponentielles Detrending, bei dem in einem vorangehenden Schritt eine einheitliche Zeitskala für die Exponentialfunktionen aus dem Verlauf der im Ozean gespeicherten Gesamtenergie abgeleitet wird (siehe Rackow et al., 2016).

	Antarktis 90–60°S	mittlere Breiten SH 60–30°S	innere Tropen 15°S–15°N	Tropen 30°S–30°N	mittlere Breiten NH 30–60°N	Arktis 60–90°N
ECHAM6-FESOM-R1 (1990er Antrieb)	1.03	1.03	0.97	0.96	0.97	0.91
MPI-ESM-LR (historical) 1950–2050	0.98	1.00	1.00	0.98	0.96	0.88

Tab. 2: Performance-Indizes für zwischenjährliche Standardabweichungen für 6 verschiedene Regionen der Erde. Daten aus Rackow et al. (2016).

Tab. ?? zeigt für den Kontrolllauf mit dem R1-Referenzgitter bei konstantem 1990er Antrieb die Performance Indizes für die Variabilität, abermals normiert gegenüber den gleichen fünf CMIP5-Modellen, sowie die entsprechenden Werte für MPI-ESM-LR. Auch bezüglich der Variabilität weist ECHAM6-FESOM-R1 demnach eine zufriedenstellende Performance auf. Lediglich in der Südhemisphäre ist die Variabilität etwas schlechter abgebildet als in den Vergleichsmodellen. Dabei ist jedoch anzumerken, dass die lange Equilibrierung mit 1990er Antrieb zu einem deutlichen wärmeren Zustand des Südozeans führt, was durchaus realistisch sein könnte. Dies zeigt jedoch zugleich, dass eine optimale Performance-Analyse bezogen auf Beobachtungsdaten ein anderes experimentelles Design erfordert, nämlich eine Equilibrierung unter präindustriellem Antrieb mit anschließendem transienten Antrieb bis hin zu den aktuellen Bedingungen - eben so, wie es für die sogenannten historischen Läufe in CMIP vorgesehen ist. Derzeitige und zukünftige Analysen der Performance von ECHAM6-FESOM folgen dieser Vorgehensweise.

Zur umfassenden Charakterisierung der simulierten dekadischen Klimavariabilität wurden wichtige großskalige atmosphärische (Nordatlantische Oszillation, NAO; Arktische Oszillation, AO; Pazifisch-Nord-Amerikanisches Muster, PNA) und ozeanische Variabilitätsmuster (Pazifische Dekaden-Oszillation, PDO; Atlantische Multidekaden-Oszillation, AMO) sowie das El-Niño Southern Oscillation (ENSO) Phänomen detaillierter untersucht. Die Ergebnisse sind in der Veröffentlichung von Rackow et al. (2016) ausführlich beschrieben.

Exemplarisch zeigt Abb. ?? die zwei wichtigsten atmosphärischen Zirkulationsmuster (auch Telekonnektionsmuster genannt) auf der Nordhemisphäre im Winter, NAO und PNA, für ERA-Interim-Reanalysedaten und für einen 1000-jährigen Zeitraum des Kontrolllaufes von ECHAM6-FESOM-R1 mit konstantem 1990er Antrieb. Die Muster von NAO und PNA wurden mittels einer rotierten EOF-Analyse der geopotenziellen Höhe der 500-hPa-Druckfläche für monatlichen Mittelwerte im Winter (Dezember, Januar, Februar) bestimmt (siehe dazu z. B. von Storch und Zwiers, 1999).

Rein visuell zeigt Abb. ?? eine gute Übereinstimmung der simulierten räumlichen Muster mit den aus ERA-Interim-Reanalyse-Daten bestimmten Mustern. Dies wird durch die entsprechenden Taylor-diagramme in Abb. ?? auch quantitativ bestätigt. Zudem stellen die Taylordiagramme in Abb. ??

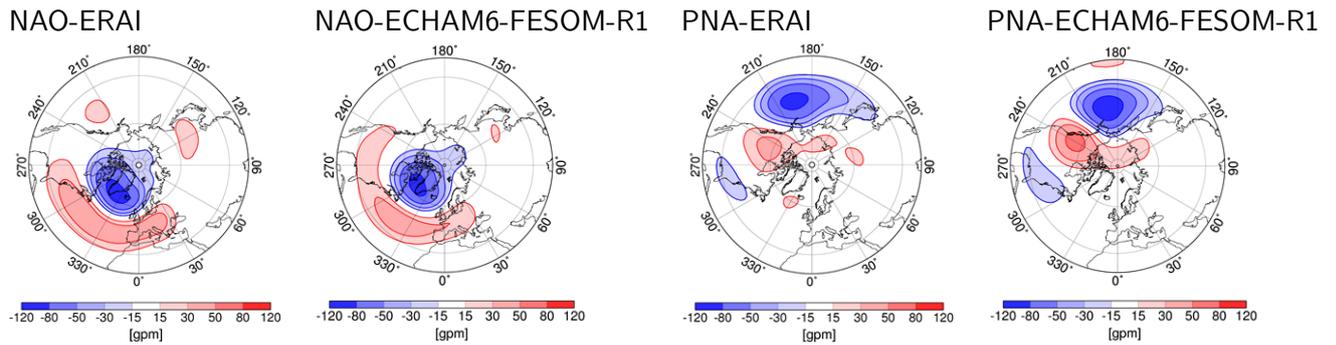


Abb. 3: Telekonnektionsmuster auf der NH im Winter, berechnet für ERA-Interim Reanalysedaten von 1979–2011 und 1000 Jahre des ECHAM6-FESOM-R1 Kontrolllaufs bei konstantem 1990er (unten). Links: NAO, rechts: PNA.

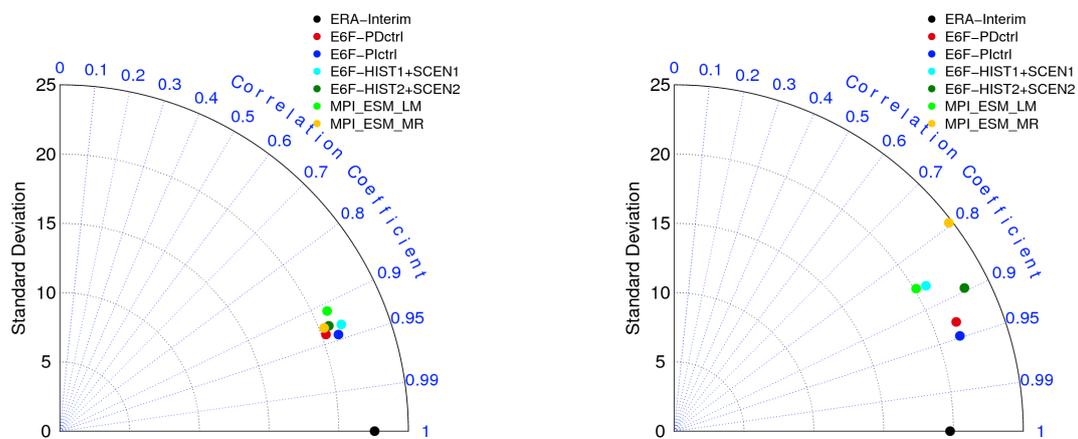


Abb. 4: Links: Taylordiagramm für atmosphärische Telekonnektionsmuster zum Vergleich verschiedener Modellsimulationen (siehe Text). Referenz: ERA-Interim 1979–2011. Standardabweichung in [gpm].

auch die von ECHAM6-FESOM simulierten Muster den Mustern gegenüber, die aus Modellsimulationen mit den Modellen MPI-ESM-LR und MPI-ESM-MR (Historischer Lauf und Szenarien-Lauf RCP4.5 kombiniert für 1979–2011) bestimmt wurden und ähnlich gut mit den ERA-Interim-Mustern übereinstimmen.

Bezüglich der Analyse wichtiger Variabilitätsmoden wurde speziell die Darstellung von ENSO in ECHAM6-FESOM mit dem Ozean-Referenzgitter (R1; etwa 25 km Gitterweite am Äquator) im Vergleich zu einem Setup ohne erhöhte Auflösung in den Tropen (etwa 100 km Gitterweite am Äquator) detaillierter untersucht. Die erhöhte isotrope Auflösung in den Tropen führt zu einer realistischeren Simulation des äquatorialen Stromsystems im Pazifik und einer besseren Darstellung des ENSO-Phänomens, sowohl bezüglich der Amplitude (Abb. ??), als auch der spektralen Eigenschaften (siehe Rackow et al., 2016). Berücksichtigt man die dominierende Rolle von ENSO für die interannuelle Klimavariabilität und die Telekonnektionen zwischen ENSO und der atmosphärischen Zirkulation in mittleren Breiten, ist durch diese Verbesserung ein positiver Einfluss auf dekadische Vorhersagen zu erwarten.

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, dass mit ECHAM6-FESOM-R1 die zeitlichen und räumlichen Strukturen der wichtigsten Variabilitätsmuster gut wiedergegeben werden können (Meilenstein M3). Damit ist eine wichtige Voraussetzung für Studien zur dekadischen Vorhersagbarkeit erfüllt.

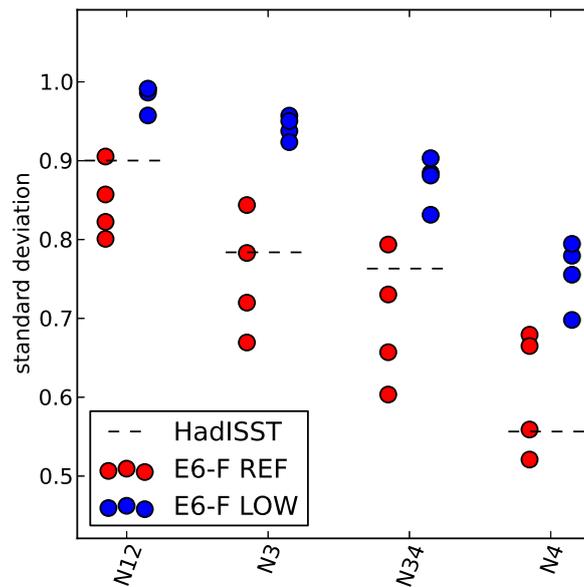


Abb. 5: Mit ECHAM6-FESOM (Gitter R1; 1990er Antrieb) simulierte Amplitude von ENSO (Standardabweichung der Oberflächentemperatur in verschiedenen Regionen des äquatorialen Pazifiks). Jeder Punkt entspricht einem 143 Jahre langen Abschnitt des Kontrolllaufes, um Vergleichbarkeit mit den Beobachtungen zu gewährleisten. Abbildung aus Rackow et al. (2016).

In Ergänzung zum 1500-jährigen Kontrolllauf mit vorgeschriebenem externen Antrieb für das Jahr 1990 wurde mit der R1-Konfiguration ein 500-jähriger Kontrolllauf für präindustrielle Bedingungen (konstanter externer Antrieb für das Jahr 1850) durchgeführt. Dieser präindustrielle Kontrolllauf lieferte die Anfangsbedingungen für zwei historische Läufe für die Jahre 1850–2005 und daran anschließende RCP8.5-Szenarien-Läufe für die Jahre 2006–2101. Diese in den Jahren 2014 und 2015 durchgeführten Simulationen wurden analog zu entsprechenden MPI-ESM-Simulationen nach den Vorgaben für CMIP5-Experimente angesetzt und waren in der Antragsphase nicht vorgesehen. Wie erwartet, werden die atmosphärischen Telekonnektionsmuster auch in diesen Simulationen gut dargestellt, wie den Taylordiagrammen in Abb. ?? zu entnehmen ist.

Die simulierte Entwicklung der arktischen Eisausdehnung und des arktischen Eisvolumens ist exemplarisch für die Monate März und September in Abb. ?? dargestellt. Während der 1990er-Kontrolllauf die beobachtungsbasierten Daten der 1980er und 1990er Jahre im Mittel relativ gut wiedergibt, erreicht die Kombination aus historischem und Szenarien-Lauf ähnliche Eisverhältnisse mit einer Zeitverzögerung von 40 bis 50 Jahren. Eine Ursache für diese verzögerte Eisabnahme im Modell dürfte ein zu großes Eisvolumen im präindustriellen Kontrolllauf (der den Anfangszustand des historischen Laufs lieferte) sein, möglicherweise auch infolge eines zu geringen polwärtigen Wärmetransports des Ozeans mit Gitter R1.

Analysen zur potentiellen Vorhersagbarkeit

Mit den Ergebnissen des Kontrolllaufs in der R1-Konfiguration mit vorgeschriebenem externen Antrieb für das Jahr 1990 wurden erste Analysen zur potentiellen Vorhersagbarkeit der wichtigsten Variabilitätsmuster durchgeführt (Milestone M8). Die lange Simulation erlaubt die Bestimmung der diagnostischen potentiellen Vorhersagbarkeit (engl. diagnostic potential predictability, DPP), die eine gute Approximation der prognostischen potentiellen Vorhersagbarkeit (engl. prognostic potential predictability, PPP) darstellt.

Die atmosphärischen Variabilitätsmuster AAO, AO, NAO und PNA weisen die geringste DPP auf; die

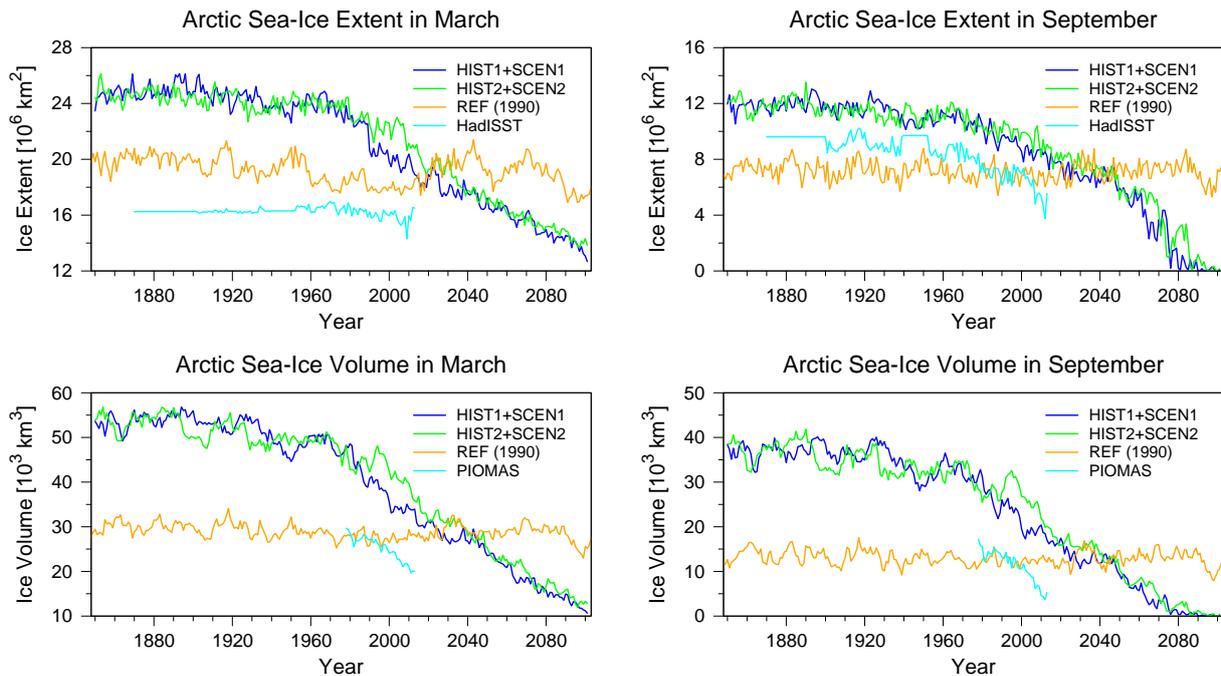


Abb. 6: Entwicklung der arktischen Eisausdehnung (oben) und des arktischen Eisvolumens (unten) im März (links) und September (rechts) in den historischen und anschließenden Szenarien-Läufen (HIST1+SCEN1 und HIST2+SCEN2) im Vergleich zum 1990er-Kontrolllauf (REF) und zu beobachtungs-basierten Daten (HadISST, PIOMAS).

Zeitskalen der korrespondierenden autoregressiven Prozesse erster Ordnung (AR1) liegen zwischen 1,5 (NAO, PNA) und 2,5 (AAO) Monaten. Das PNA-Muster zeigt Abweichungen vom AR1-Verhalten, was auf den Einfluss langsamer Prozesse, wie z. B. ENSO, auf das zeitliche Verhalten der PNA hinweist. Die tropischen Muster der Meeresoberflächentemperatur-Variabilität zeigen einen schnelleren Abfall der DPP als die korrespondierenden AR1-Prozesse. Dies zeigt quasi-periodisches Verhalten an. Für das ENSO-Muster korrespondiert die DPP mit einem AR1-Prozess mit einer Dekorrelationszeit von rund 2 Jahren für monatliche Zeitskala und 6 Monaten auf der dekadischen Zeitskala. Die außer-tropischen Muster der Meeresoberflächentemperatur-Variabilität (PDO, AMO) weisen die größte Vorhersagbarkeit auf. Die Vorhersagbarkeit der PDO korrespondiert mit einem AR1-Prozess mit einer Dekorrelationszeit von 2 bis 2,5 Jahren auf allen Zeitskalen. Die DPP der AMO fällt langsamer als ein AR1-Prozess ab und weist darauf hin, dass Prozesse mit Zeitskalen bis ungefähr 32 Jahren das zeitliche Verhalten der AMO bestimmen. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse ist in der Veröffentlichung von Rackow et al. (2016) nachzulesen.

Mechanismen dekadischer Klimavariabilität im TORUS-Modellsystem

Im Fokus der Untersuchungen zu Mechanismen dekadischer Klimavariabilität stand der Mechanismus, welcher der im langen 1990er-Kontrolllauf mit ECHAM6-FESOM-R1 stark ausgeprägten Atlantischen Multidekaden-Oszillation (AMO) zugrunde liegt (Milestone M7). Die Konzentration auf diesen Aspekt ist aus TORUS-Perspektive von Bedeutung, da Phase und Stärke dieser Oszillation einen dominanten Einfluss auf die Variabilität der arktischen Meereiskante im atlantischen Sektor hat.

Die starken Schwankungen der AMO sind mit dem Wechsel von Phasen mit und ohne Tiefenwasserbildung in der Labradorsee verbunden (siehe Sidorenko et al., 2015). Abb. ?? zeigt die simulierte Tiefe der Mischungsschicht (MLD) in der Labradorsee. Dort ist die Konvektion weniger stark ausgeprägt als in den anderen Gebieten mit Tiefenkonvektion auf der Nordhalbkugel (nordöstlicher Nordatlantik und Grönlandsee). Die Zeitreihe des jährlichen Maximums der Tiefe der Mischungsschicht in der Labrador-

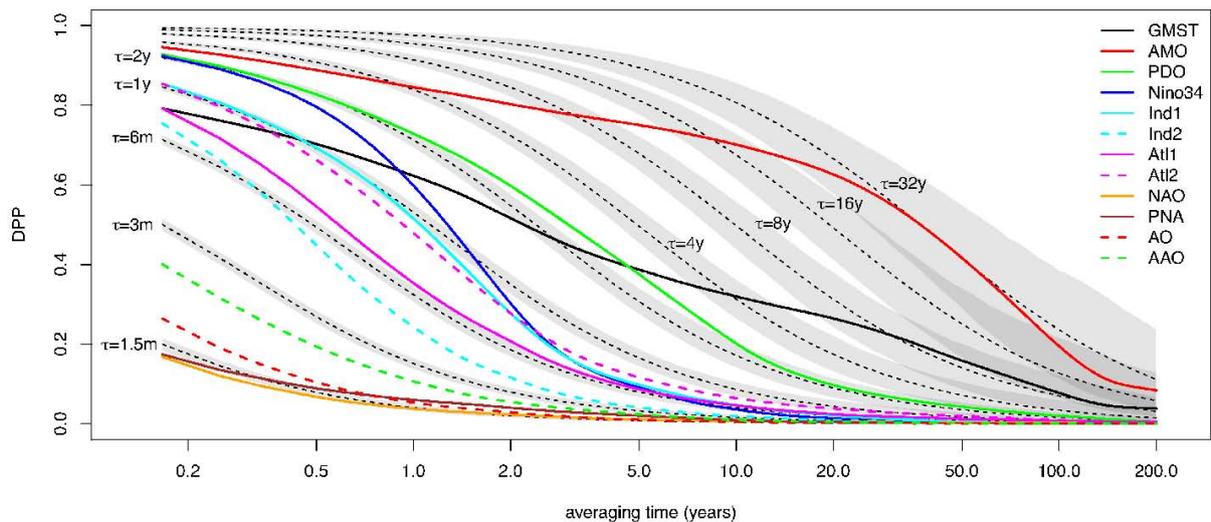


Abb. 7: Diagnostische potentielle Vorhersagbarkeit (DPP) der wichtigsten Variabilitätsmuster, berechnet für den Kontrolllauf von ECHAM6-FESOM (Gitter R1; 1990er Antrieb, Modelljahre 501–1500). Gestrichelte schwarze Linien kennzeichnen die DPP von korrespondierenden autoregressiven Prozessen erster Ordnung mit der entsprechenden Dekorrelationszeit τ , graue Bereiche die 5% Vertrauensintervalle. Abbildung aus Rackow et al. (2016).

see schwankt zwischen 2000 m und 200 m, mit länger andauernden Perioden starker und schwacher Konvektion, die mit wechselnden Perioden einer eisfreien und einer eisbedeckten Labradorsee verbunden sind. Dementsprechend ist die Ausdehnung des arktischen Meereises vor allem im März stark korreliert mit den Phasen ohne Tiefenwasserbildung in der Labradorsee (siehe Abb. ??).

Eine genaue Analyse der ECHAM6-FESOM Simulation zeigte, dass die Phasen ausbleibender Tiefenwasserbildung in der Labradorsee einige Jahre nach Ereignissen stattfinden, bei denen besonders warmes und salziges Wasser des tiefen Nordatlantiks in die tiefe Labradorsee eindringt. Eine dadurch verursachte hydrosterische Abschwächung des Subpolarwirbels bewirkt eine Akkumulation von Süßwasser in der Labradorsee, was wiederum zu einer stabileren Schichtung führt. Eine detaillierte Darstellung dieser Wirkungskette findet sich in der Veröffentlichung von Sidorenko et al. (2015).

Desweiteren wurde die Variabilität und Vorhersagbarkeit der arktischen Eiskante in ECHAM6-FESOM-R1 umfangreich untersucht, wobei eine neu entwickelte Verifikationsmetrik – der Integrierte Eiskantenfehler (IIEE) – auch Rückschlüsse auf Mechanismen zulässt. So konnte gezeigt werden, dass eine Skalenabhängigkeit der Vorhersagbarkeit vorliegt: Kleinskalige Variabilitätsmuster der Eiskante sind weniger vorhersagbar als großskalige Muster. Bei diesen Untersuchungen wurde ferner festgestellt, dass eine erhöhte Vorhersagbarkeit der arktischen Eiskante im Spätwinter, also zur Zeit der maximalen Eisausdehnung, vorhanden ist. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Eiskante in dieser Zeit des Jahres sich in Regionen des Nordatlantiks befindet, in denen ein starker Einfluss der Atlantischen Multidekaden-Oszillation vorherrscht. Die langsame Zeitskala dieser Oszillation (mehrere Jahrzehnte) macht es möglich, dass die spätwinterliche Eiskante im Nordatlantik für einige Jahre zu einem nennenswerten Anteil vorhersagbar bleibt. Details dieser Analysen finden sich in der Veröffentlichung von Goessling et al. (2016).

Einschränkend muss gesagt werden, dass unter gegenwärtigen Klimabedingungen der Zustand einer eisbedeckten Labradorsee nicht beobachtet wird. Hingegen zeigen andere komplexe Ozean- bzw. Klimamodelle ebenfalls Phasen mit schwacher Konvektion und winterlichem Zufrieren der Labradorsee (z. B. Gent et al., 2011; Sterl et al., 2012). Um den Einfluss der Modellauflösung auf die im Referenzlauf zu stark ausgeprägte Atlantische Multidekaden-Oszillation (einhergehend mit phasenweisem Ausbleiben von Tiefenkonvektion in der Labradorsee; Abb. ??) zu untersuchen, wurden im Nordatlan-

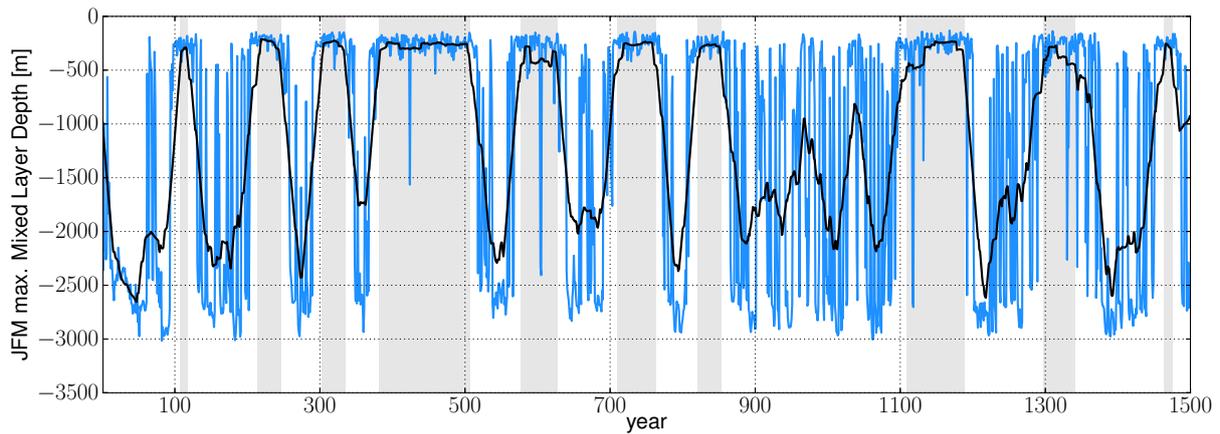


Abb. 8: Von ECHAM6-FESOM (Gitter R1; 1990er Antrieb) simulierte Tiefe der Mischungsschicht in der Labradorsee. Graue Abschnitte markieren Phasen ohne Tiefenwasserbildung. Diese gehen einher mit einer deutlich abgeschwächten Atlantischen Meridionalen Umwälzzirkulation (nicht gezeigt). Die schwarze Kurve zeigt ein 30-jähriges gleitendes Mittel. Abbildung aus Rackow et al. (2016).

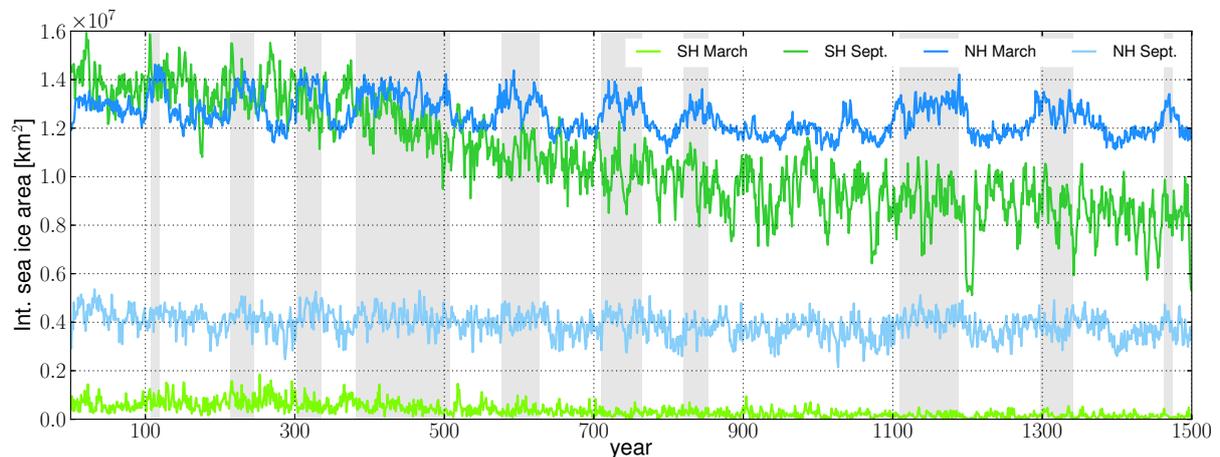


Abb. 9: Von ECHAM6-FESOM (Gitter R1; 1990er Antrieb) simulierte Meereisfläche in beiden Hemisphären im März und im September. Besonders die Ausdehnung des arktischen Meereises im März (dunkelblaue Kurve) ist stark korreliert mit den Phasen ohne Tiefenwasserbildung in der Labradorsee (graue Bereiche). Abbildung aus Rackow et al. (2016).

tik und im Bereich der Überstromregionen zwischen Arktis und Nordatlantik verschiedene Auflösungen mit entsprechenden Anpassungen der Bathymetrie getestet. Dabei musste festgestellt werden, dass die Phasen ohne Tiefenkonvektion gegenüber diesen Änderungen robust sind. Das bedeutet, dass dieses Phänomen durch andere, nicht-lokale oder nicht von horizontaler Auflösung beeinflussbare Faktoren verursacht wird. Schlussendlich ist dieser Bias durch das Update der Atmosphärenkomponente auf ECHAM6.3 behoben worden, wobei die genaue Ursache unklar ist.

Sensitivitätsstudien im TORUS-Modellsystem mit regionaler Gitterverfeinerung (Gitter R1)

Zusätzlich zu den ursprünglich im Projekt geplanten Arbeiten wurde ECHAM6-FESOM in der R1-Konfiguration für eine Reihe von Sensitivitätsstudien zur Parametrisierung der Austauschkoefizienten in der atmosphärischen Grenzschicht über Meereis eingesetzt. Dies geschah in Zusammenarbeit mit dem MiKlip-Projekt SPARCS (Modul B), das im Laufe von MiKlip mehrere Versionen einer neu entwickelten Parametrisierung der Austauschkoefizienten in der atmosphärischen Grenzschicht über

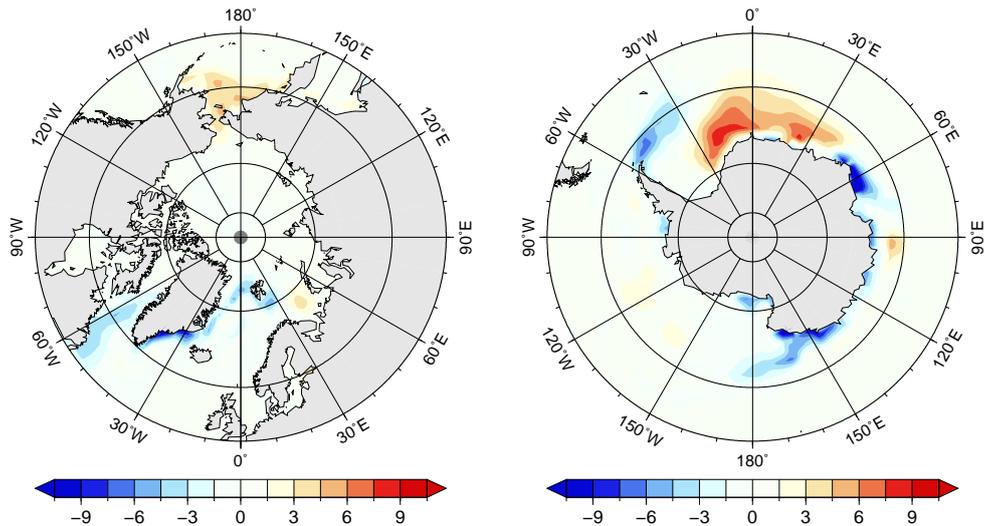


Abb. 10: Änderungen der simulierten Meereisbedeckung [%] im arktischen Winter (DJF; links) und im antarktischen Winter (JJA; rechts) infolge der neuen Parametrisierung (Version 3), basierend auf einem Ensemble von 10 jeweils 20 Jahre langen ECHAM6-FESOM-Läufen mit der neuen und 10 Läufen mit der Standard-Parametrisierung der Austauschkoefizienten über Meereis.

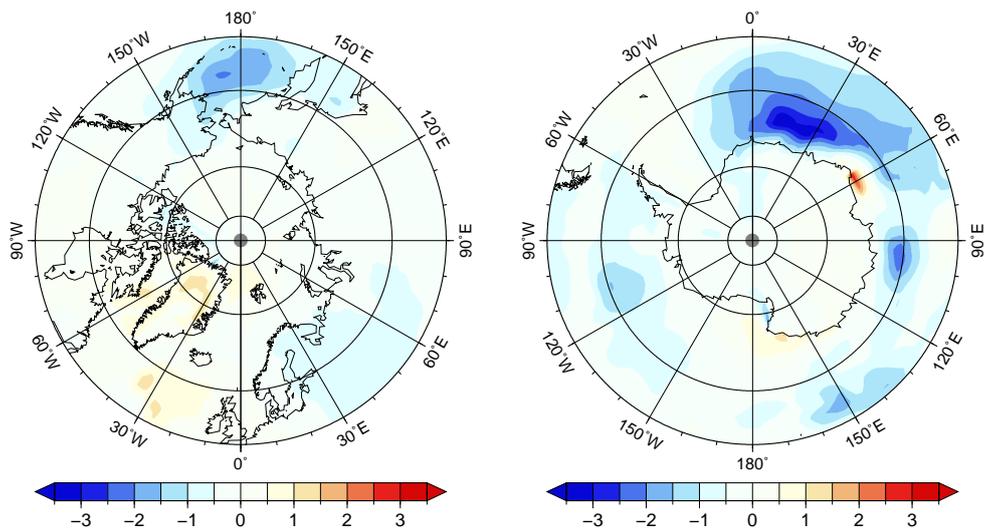


Abb. 11: Normierte Differenz der simulierten Temperaturen in 2 m Höhe im arktischen Winter (DJF; links) und im antarktischen Winter (JJA; rechts) zwischen neuer Parametrisierung (Version 3) und Standard-Parametrisierung der Austauschkoefizienten über Meereis, basierend auf einem Ensemble von je 10 jeweils 20 Jahre langen ECHAM6-FESOM-Läufen. Eine normierte Differenz kleiner als -2 oder größer als 2 kann als zu 95 % statistisch signifikant angesehen werden.

Meereis lieferte (Lüpkes et al., 2012, 2013; Lüpkes und Gryanik, 2015), wobei der zusätzliche Formwiderstand von Eiskanten ein zentrales Element der neuen Parametrisierung ist.

Während mit der ersten Version der neuen Parametrisierung nur kurze Testläufe durchgeführt wurden, wurden mit der zweiten und dritten Version, als auch mit der Standard-Parametrisierung, jeweils ein Ensemble von 10 Simulationen über 20 Jahre durchgeführt, wobei die Ozean-Initialisierungsstrategie in diesem Fall darin bestand, Anfangszustände aus verschiedenen Perioden des 1500-jährigen Kontrolllaufs zu verwenden. Die neueste, dritte Version der verbesserten Parametrisierung beinhaltet, neben dem schon vorher eingeführten Formwiderstand von Eisschollen und offenen Rinnen im Eis, eine neue Formulierung für den Wärmeaustauschkoefizienten, die den Einfluss von Eisrändern explizit berück-

sichtigt, die Einbeziehung des Formwiderstandes von Schmelztümpeln auf dem Eis und insbesondere die Erweiterung des Schemas für nicht neutrale Schichtung über Eis und Wasser (für Details siehe Lüpkes und Gryanik, 2015).

In dem Ensemble von ECHAM6-FESOM-Sensitivitätsläufen zeigt die zweite Version der neuen Parametrisierung, infolge des zusätzlichen Formwiderstands, eine allgemeine Reduktion des Meereises durch stärkeren Transport. Diese Reduktion des Meereises stellt einen positiven Effekt für die Arktis dar, verstärkt aber die modelltypische Unterschätzung der Eisausdehnung in der Antarktis. Die dritte Version der neuen Parametrisierung zeigt insbesondere in der Antarktis deutliche Verbesserungen gegenüber der zweiten Version, während die positiven Effekte der zweiten Version in der Arktis etwas moderater, aber immer noch vorhanden sind. Im arktischen Winter wird die im Modell vorhandene Überschätzung von Meereis in der Ladorador- und Grönlandsee weiterhin reduziert (siehe Abb. ??, links), wenn auch nicht so stark wie in der zweiten Version. Ein neuer positiver Effekt ist die leichte Zunahme von Meereis in der Beringsee. Im antarktischen Winter zeigt sich mit der dritten Version der neuen Parametrisierung erstmals eine Reduktion der vorhandenen Unterschätzung der Eisausdehnung östlich der Weddellsee (Abb. ??, rechts). Dadurch simuliert das Modell dort auch signifikant kältere Temperaturen (siehe Abb. ??), was ebenfalls einen positiven Effekt darstellt.

Unabhängig von der Version der neuen Parametrisierung sind die Auswirkungen auf die Simulation des Meereises, trotz eines allgemein verstärkten Impulsflusses durch den zusätzlichen Formwiderstand des Meereises, in den einzelnen Ensemblemitgliedern jedoch uneinheitlich und wesentlich von den atmosphärischen Windfeldern und damit von den großräumigen atmosphärischen Zirkulationsstrukturen abhängig. Letztere zeigen wiederum eine äußerst nichtlineare Reaktion auf die neue Parametrisierung, sodass die positiven Effekte der neuen Parametrisierung in den meisten Fällen statistisch nicht signifikant sind. Vorhandene Modellschwächen können in einigen Fällen zwar leicht reduziert, aber nicht beseitigt werden. Dennoch hat die neue Parametrisierung der Austauschkoefizienten über Meereis das Potenzial, Modellsimulationen zu verbessern, da sie die Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Meereis realistischer beschreibt.

Die Kooperation zwischen TORUS und SPARCS entwickelte sich erst während der Laufzeit von MiKlip. Die neue Parametrisierung der Austauschkoefizienten über Meereis kann problemlos ins MiKlip-Modellsystem aufgenommen werden, da sie nur die Atmosphärenkomponente betrifft, die in beiden Modellsystemen die gleiche ist. Die TORUS-SPARCS-Kooperation liefert somit einen potenziellen Beitrag zur physikalischen Verbesserung des dekadischen Vorhersagesystems.

Um das Problem der Modell-Unsicherheit durch spezifische Parametrisierungen zu untersuchen, wurden ferner Sensitivitätsstudien zum Effekt von stochastischen Meereis-Parametrisierungen im Rahmen von Ensemble-Vorhersagen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass stochastische Meereis-Parametrisierungen zu einem zusätzlichen Ensemble-Spread führen, aber auch zu Änderungen der mittleren Verteilung des arktischen Meereises. Details dieser Untersuchungen finden sich in den Veröffentlichungen von Juricke et al. (2014); Juricke und Jung (2014).

Das TORUS-Modellsystem mit regionaler und kleinskaliger Verfeinerung (Gitter R2)

Ein wichtiger Punkt in TORUS war die Analyse der Auswirkungen regionaler und kleinskaliger Verfeinerung des Ozeangitters auf die Simulationsergebnisse (Milestone M6). Diesbezüglich wurde eine verbesserte Modellkonfiguration mit einem allgemein höher aufgelösten Ozeangitter erstellt. Dazu wurde eine FESOM-Konfiguration auf einem neuen Gitter (R2) gewählt, die bereits im Rahmen der Coordinated Ocean Reference Experiments Phase 2 (CORE2) mit anderen Ozeanmodellen und Beobachtungen verglichen wurde (Griffies et al., 2014; Danabasoglu et al., 2014).

Die Auflösung des R2-Gitters ist in Abb. ?? (rechts) dargestellt. Im Vergleich zum R1-Referenzgitter weist das Gitter eine höhere Auflösung im nördlichen Nordatlantik, im kanadischen arktischen Archipel,

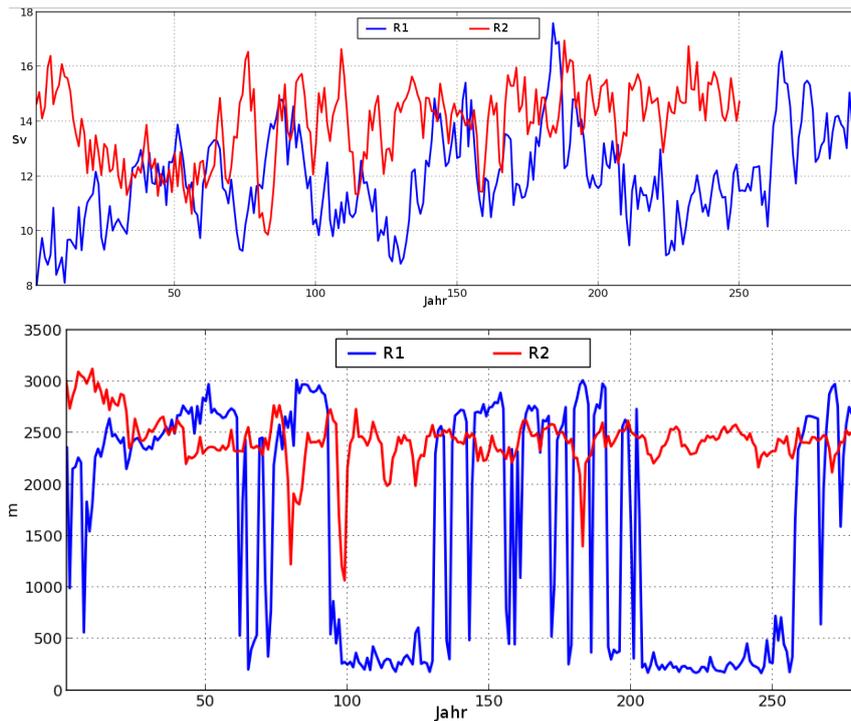


Abb. 12: Simulierte Stärke der Atlantischen Meridionalen Umwälzzirkulation (oben) und simulierte Tiefe der Mischungsschicht in der Labradorsee (unten) für das R1-Gitter (blau) und das R2-Gitter (rot).

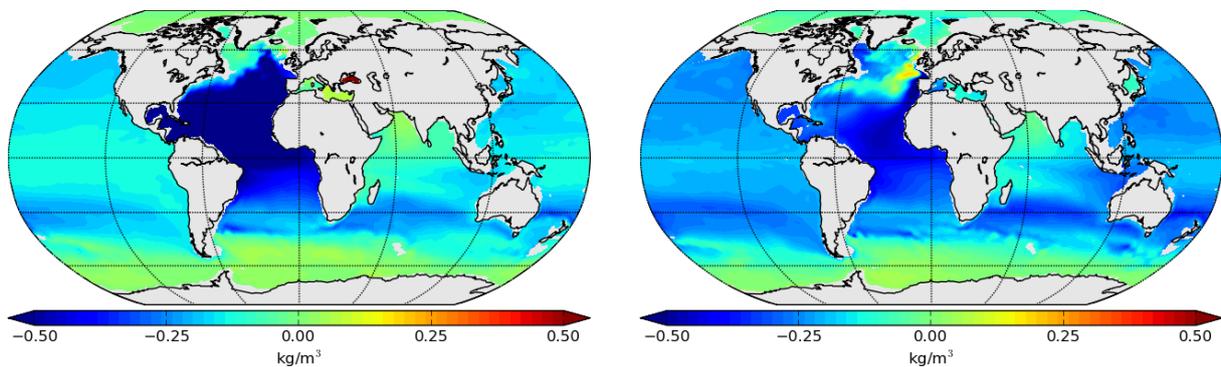


Abb. 13: Simulierte mittlere potentielle Dichte über 50 Jahre mit dem R1-Gitter (links) und dem R2-Gitter (rechts).

in der Labradorsee sowie in der Arktis im Allgemeinen auf. Die Auflösung im Umfeld der Antarktis wurde ebenfalls verfeinert.

Gekoppelte Simulationen über mehr als 250 Jahre wurden mit ansonsten vergleichbaren Einstellungen wie mit der R1-Konfiguration durchgeführt. Ein Vergleich mit den Simulationen der R1-Konfiguration zeigt eine verstärkte Tiefenwasserbildung in der Labradorsee (Abb. ??, unten) mit einhergehender Verstärkung der Umwälzzirkulation im Atlantik (Abb. ??, oben) und einen entsprechend reduzierten (Dichte-)Bias im tiefen Nordatlantik (Abb. ??, rechts), was den Erwartungen von Sidorenko et al. (2015) entspricht. Weiterhin zeigt sich mit der R2-Konfiguration eine stark verringerte Eisbedeckung in der Labrador- und Barentssee (Abb. ??).

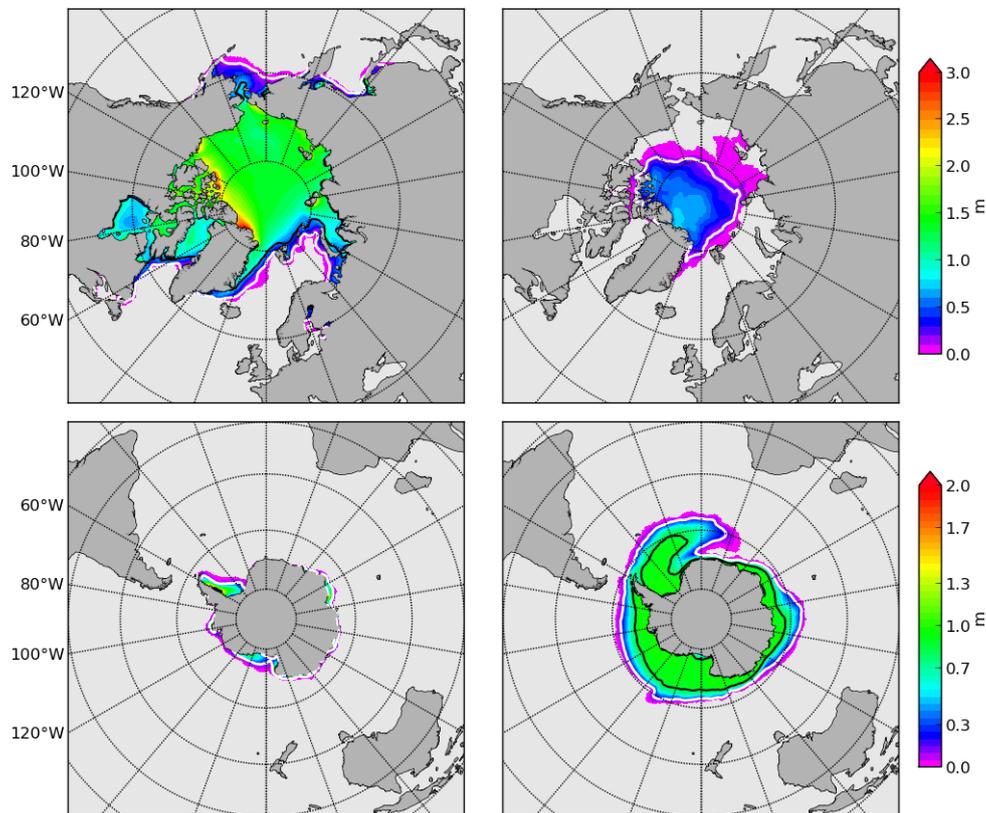


Abb. 14: Mittlere Meereisdicke über 50 Jahre mit dem R2-Gitter im März (links) und September (rechts) für die Arktis (oben) und die Antarktis (unten).

Vorhersagbarkeitsstudien und Vorarbeiten für dekadische Vorhersagen mit dem TORUS-Modellsystem

In Zusammenarbeit mit dem MiKlip-Projekt MODINI (Modul A) wurden notwendige Arbeiten zur Erzeugung von Anfangsbedingungen für dekadische Vorhersagen durchgeführt. Im Detail wurden die technischen Voraussetzungen für die Anwendung der in MODINI entwickelten Initialisierungstechnik der partiellen Kopplung im TORUS-Modellsystem ECHAM6-FESOM implementiert. Dabei wird im ansonsten frei laufenden gekoppelten Modell der Windstress, der den Ozean (inklusive Meereis) an der Oberfläche antreibt, durch aus Beobachtungen abgeleiteten Windstress (bzw. deren Anomalien) ersetzt. In MODINI konnte gezeigt werden, dass die Technik insgesamt ähnlich gut funktioniert, wie die im MiKlip-Modellsystem standardmäßig eingesetzte Technik (Nudging des Ozeans an eine Reanalyse). Nahe dem Äquator jedoch hat die Initialisierung mittels partieller Kopplung deutliche Vorteile (auch im Hindcast-Skill widergespiegelt) dadurch, dass dynamische Ungleichgewichte und damit verursachte Initialschocks vermieden werden.

In ECHAM6-FESOM wurden mit dieser Methode bislang technische Tests durchgeführt, bei denen nicht aus Beobachtungen abgeleiteter Windstress, sondern Windstress aus anderen Modellläufen eingespeist wurde. Diese Tests haben gut funktioniert, so dass im Rahmen anderer Projekte nun an diese Resultate aus TORUS angeknüpft werden kann.

Die Durchführung dekadischer Vorhersagen erfordert die Erzeugung großer Vorhersage-Ensembles. Um eine effektive Generierung großer Vorhersage-Ensembles zu ermöglichen, wurde eine Shellskript-basierte Infrastruktur entwickelt, die einen problemlosen Workflow beim Setup und der parallelen Durchführung der individuellen Experimente gewährleistet. In diese Infrastruktur wurden mehrere Techniken für die Erzeugung von Initialstörungen eingebettet, die notwendig sind, um ein chaotisch bedingtes Divergieren der individuellen Ensemblemitglieder auszulösen.

Wie oben dargelegt, wurden noch keine mit aus Beobachtungen abgeleiteten Daten initialisierten Vorhersage-Ensembles (bzw. Hindcast-Ensembles) mit ECHAM6-FESOM durchgeführt. Es wurden jedoch mit ECHAM6-FESOM idealisierte Vorhersage-Ensembles in großem Umfang erzeugt, auf denen mehrere Untersuchungen im Bereich der potentiellen Vorhersagbarkeit, mit einem Fokus auf Meereis, basieren. Desweiteren wurde eine Vielzahl an ECHAM6-FESOM-Ensembles generiert und analysiert im Hinblick auf Telekonnektionen zwischen den Polargebieten und den mittleren Breiten.

In Verbindung mit TORUS wurde eine stochastische Meereisphysik implementiert, wobei in der Berechnung der Steifigkeit des Meereises ein stochastischer Term hinzugefügt wird. Motiviert war diese Arbeit erstens durch die Feststellung, dass Vorhersagen gerade in den Polargebieten oft zu wenig Streuung aufweisen, also überkonfident sind, sowie zweitens dass eine explizite Darstellung von Unsicherheiten zu einer realistischeren Eisdickenverteilung führen könnte. Die stochastischen Terme wurden mit autoregressiven Prozessen erster Ordnung (AR1) simuliert, wobei eine bestimmte raum-zeitliche Korrelation aufgeprägt wurde, um die Stärke der Auswirkungen zu erhöhen. Der Vergleich idealisierter Vorhersage-Ensembles mit und ohne stochastische Meereisphysik hat gezeigt, dass in der Regel die Divergenz der Meereiszustände hauptsächlich durch den divergierenden Windstress bestimmt wird. Ein signifikanter Effekt konnte jedoch im inneren Bereich der Meereisdecke für kurzfristige Vorhersagen über einige Tage nachgewiesen werden, wenn die Atmosphärenzustände noch hinreichend ähnlich sind. Details dieser Studien sind in der Veröffentlichung von Juricke et al. (2014) nachzulesen.

Im Rahmen des Projekts „Arctic Predictability and Prediction On Seasonal-to-Interannual Timescales“ (APPOSITE) konnten zum ersten Mal umfangreiche Daten des neuen gekoppelten Modells zu einem groß angelegten internationalen Modellvergleich beitragen. Insgesamt sieben Modellierungszentren haben idealisierte Vorhersage-Ensembles aus einem Gleichgewichtslauf mit konstantem Antrieb heutiger Bedingungen (1990 oder 2005) und Anfangsstörungen der Meeresoberflächentemperaturen (weißes Rauschen der Amplitude 10^{-4} K) zu dem an der Universität Reading koordinierten Projekt beigetragen. Während das experimentelle Design global ist, lag der Fokus der Analysen auf dem arktischen Meereis. Es konnte für die Arktis gezeigt werden, dass das integrierte Meereisvolumen in allen Modellen über den gesamten 3-jährigen Vorhersagezeitraum vorhersagbar ist (Day et al., 2015). Auch die Gesamtausdehnung ist über den gesamten Zeitraum, wenn auch weniger gut, vorhersagbar, konsistent allerdings nur im borealen Winter und Frühling (AEE (rote Kurven) in Abb. ??). Im Sommer und Herbst dagegen ist in einigen Modellen, einschließlich ECHAM6-FESOM, schon nach etwa einem Jahr keine signifikante Vorhersagbarkeit mehr vorhanden. Mit der neuen Metrik, dem Integrierten Eiskantenfehler (IIEE), konnte ferner gezeigt werden, dass die Eiskante insgesamt noch schneller Vorhersagbarkeit einbüßt als die Gesamtausdehnung (schwarze Kurven in Abb. ??). Das bedeutet, dass das Potenzial für nutzer-relevante Meereisvorhersagen etwas geringer sein könnte, als bislang angenommen. Weitere Details dieser Studien sind in der Veröffentlichung von Goessling et al. (2016) nachzulesen.

Wie oben berichtet, wurden bereits technische Arbeiten durchgeführt, um das TORUS-Modellsystem ECHAM6-FESOM mit Beobachtungen zu initialisieren. Basierend auf dieser wichtigen innerhalb von TORUS geleisteten Vorarbeit ist geplant, reale Hindcasts und Forecasts mit ECHAM6-FESOM im Rahmen anderer Projekte zeitnah umzusetzen.

Zitierte Literatur

Danabasoglu, G., S. G. Yeager, D. Bailey, E. Behrens, M. Bentsen, D. Bi, A. Biastoch, C. Böning, A. Bozec, V. M. Canuto, C. Cassou, E. Chassignet, A. C. Coward, S. Danilov, N. Diansky, H. Drange, R. Farneti, E. Fernandez, P. G. Fogli, G. Forget, Y. Fujii, S. M. Griffies, A. Gusev, P. Heimbach, A. Howard, T. Jung, M. Kelley, W. G. Large, A. Leboissetier, J. Lu, G. Madec, S. J. Marsland, S. Masina, A. Navarra, A. J. G. Nurser, A. Pirani, D. S. y Méliá, B. L. Samuels, M. Scheinert, D. Sidorenko, A.-M. Treguier, H. Tsujino, P. Uotila, S. Valcke, A. Voldoire und Q. Wang (2014):

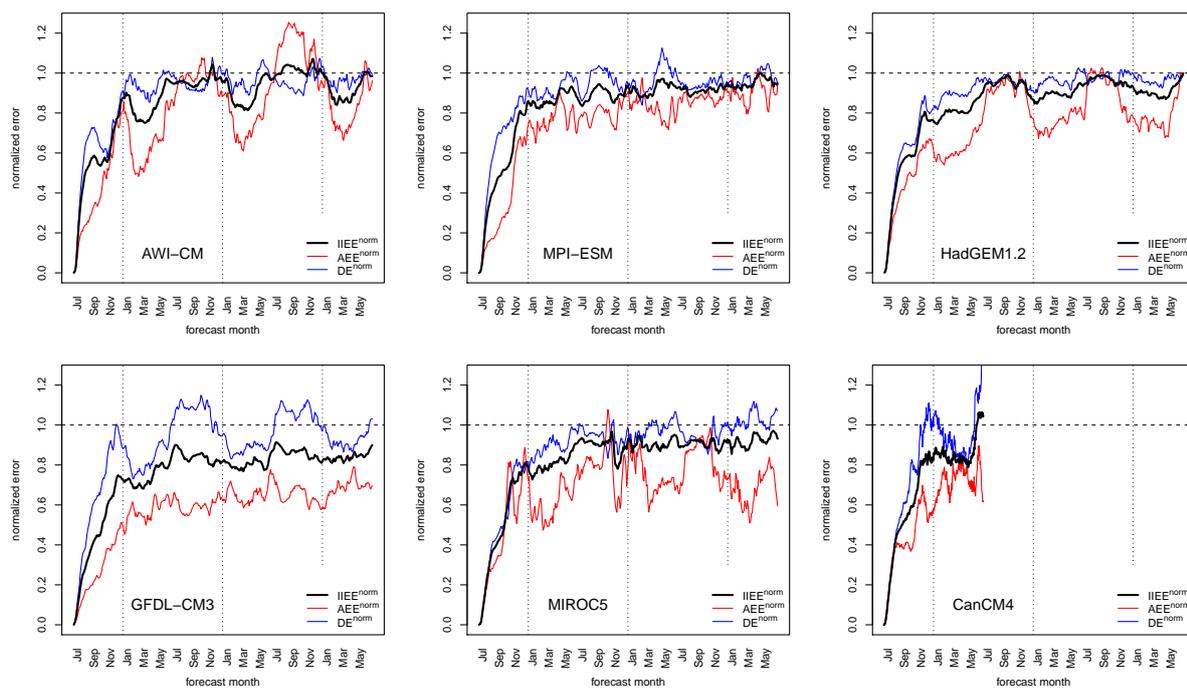


Abb. 15: Vorhersagbarkeit der arktischen Eiskante in sechs der sieben Klimamodelle, die Daten zu APPOSITE beigetragen haben, einschließlich ECHAM6-FESOM. Der integrierte Eiskantenfehler (IEE) ist definiert als die Fläche, in der die Vorhersage und die Wahrheit (in diesem idealisierten Setup eine andere Vorhersage, sonst Beobachtungen) sich uneinig darüber sind, ob die Eiskonzentration größer oder kleiner gleich 15 % ist. Der IEE lässt sich zerlegen in den Fehler der Gesamtausdehnung (AEE) und einen Deplazierungsfehler (DE). Gezeigt sind Werte, die mittels der klimatologischen Fehler normiert wurden. Abbildung aus Goessling et al. (2016).

North Atlantic simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Part I: Mean states, *Ocean Model.*, 73, 76–107, doi: [10.1016/j.ocemod.2013.10.005](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.10.005).

Day, J., S. Tietsche, M. Collins, H. Goessling, V. Guemas, A. Guillory, W. Hurlin, M. Ishii, S. Keeley, D. Matei, R. Msadek, M. Sigmond, H. Tatebe und E. Hawkins (2015): The Arctic Predictability and Prediction on Seasonal-to-Interannual Timescales (APPOSITE) data set, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 8, 8809–8833, doi: [10.5194/gmdd-8-8809-2015](https://doi.org/10.5194/gmdd-8-8809-2015).

Dorn, W., K. Dethloff und A. Rinke (2009): Improved simulation of feedbacks between atmosphere and sea ice over the Arctic Ocean in a coupled regional climate model, *Ocean Model.*, 29, 103–114, doi: [10.1016/j.ocemod.2009.03.010](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.03.010).

Gent, P. R., G. Danabasoglu, L. J. Donner, M. M. Holland, E. C. Hunke, S. R. Jayne, D. M. Lawrence, R. B. Neale, P. J. Rasch, M. Vertenstein, P. H. Worley, Z.-L. Yang und M. Zhang (2011): The Community Climate System Model Version 4, *J. Climate*, 24, 4973–4991, doi: [10.1175/2011jcli4083.1](https://doi.org/10.1175/2011jcli4083.1).

Goessling, H. F., S. Tietsche, J. J. Day, E. Hawkins und T. Jung (2016): Predictability of the Arctic sea-ice edge, *Geophys. Res. Lett.*, 43, L067232, doi: [10.1002/2015GL067232](https://doi.org/10.1002/2015GL067232).

Griffies, S. M., J. Yin, P. J. Durack, P. Goddard, S. C. Bates, E. Behrens, M. Bentsen, D. Bi, A. Biastoch, C. W. Böning, A. Bozec, E. Chassignet, G. Danabasoglu, S. Danilov, C. M. Domingues, H. Drange, R. Farneti, E. Fernandez, R. J. Greatbatch, D. M. Holland, M. Ilicak, W. G. Large, K. Lorabacher, J. Lu, S. J. Marsland, A. Mishra, A. J. G. Nurser, D. S. y Méliá, J. B. Palter, B. L. Samuels, J. Schröter, F. U. Schwarzkopf, D. Sidorenko, A. M. Treguier, Y. Tseng, H. Tsujino, P. Uotila, S. Valcke, A. Voldoire, Q. Wang, M. Winton und X. Zhang (2014): An assessment of

- global and regional sea level for years 1993–2007 in a suite of interannual CORE-II simulations, *Ocean Model.*, 78, 35–89, doi: [10.1016/j.ocemod.2014.03.004](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.03.004).
- Juricke, S. und T. Jung (2014): Influence of stochastic sea ice parametrization on climate and the role of atmosphere–sea ice–ocean interaction, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 372, 20130283, doi: [10.1098/rsta.2013.0283](https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0283).
- Juricke, S., H. F. Goessling und T. Jung (2014): Potential sea ice predictability and the role of stochastic sea ice strength perturbations, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 8396–8403, doi: [10.1002/2014GL062081](https://doi.org/10.1002/2014GL062081).
- Lüpkes, C. und V. M. Gryanik (2015): A stability-dependent parametrization of transfer coefficients for momentum and heat over polar sea ice to be used in climate models, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 552–581, doi: [10.1002/2014JD022418](https://doi.org/10.1002/2014JD022418).
- Lüpkes, C., V. M. Gryanik, J. Hartmann und E. L. Andreas (2012): A parametrization, based on sea ice morphology, of the neutral atmospheric drag coefficients for weather prediction and climate models, *J. Geophys. Res.*, 117, D13112, doi: [10.1029/2012JD017630](https://doi.org/10.1029/2012JD017630).
- Lüpkes, C., V. M. Gryanik, A. Rösel, G. Birnbaum und L. Kaleschke (2013): Effect of sea ice morphology during Arctic summer on atmospheric drag coefficients used in climate models, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 446–451, doi: [10.1002/grl.50081](https://doi.org/10.1002/grl.50081).
- Rackow, T., H. F. Goessling, T. Jung, D. Sidorenko, T. Semmler, D. Barbi und D. Handorf (2016): Towards multi-resolution global climate modeling with ECHAM6-FESOM. Part II: climate variability, *Clim. Dyn.* submitted.
- Reichler, T. und J. Kim (2008): How well do coupled models simulate today's climate?, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89, 303–311.
- Sidorenko, D., T. Rackow, T. Jung, T. Semmler, D. Barbi, S. Danilov, K. Dethloff, W. Dorn, K. Fieg, H. F. Goessling, D. Handorf, S. Harig, W. Hiller, S. Juricke, M. Losch, J. Schröter, D. V. Sein und Q. Wang (2015): Towards multi-resolution global climate modeling with ECHAM6–FESOM. Part I: model formulation and mean climate, *Clim. Dyn.*, 44, 757–780, doi: [10.1007/s00382-014-2290-6](https://doi.org/10.1007/s00382-014-2290-6).
- Sterl, A., R. Bintanja, L. Brodeau, E. Gleeson, T. Koenigk, T. Schmith, T. Semmler, C. Severijns, K. Wyser und S. Yang (2012): A look at the ocean in the EC-Earth climate model, *Clim. Dyn.*, 39, 2631–2657.
- Tietsche, S., J. J. Day, V. Guemas, W. J. Hurlin, S. P. E. Keeley, D. Matei, R. Msadek, M. Collins und E. Hawkins (2014): Seasonal to interannual Arctic sea ice predictability in current global climate models, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1035–1043, doi: [10.1002/2013GL058755](https://doi.org/10.1002/2013GL058755).
- Von Storch, H. und F. W. Zwiers (1999): *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 484 pp.

II.2 Darstellung der Mittelverwendung

Für das Projekt TORUS waren Personalkosten und Reisekosten beantragt und bewilligt worden. Durch die eingestellten Projektwissenschaftler (eine Vollzeit-PostDoc Stelle und zwei halbe Stellen) und deren gute Zusammenarbeit mit den am Projekt beteiligten AWI-WissenschaftlerInnen konnten die oben dargestellten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse erzielt werden. Die Reisemittel wurden für innerdeutsche Reisen zu Projekt- und MiKlip-Treffen und international Reisen zu Tagungen in Anspruch genommen.

II.3 Notwendigkeit der geleisteten Arbeit

Um der Hauptfragestellung des Projekts nachzugehen, wie sich eine erhöhte Auflösung der arktischen Region in Klimamodellen und eine alternative Formulierung der Ozeandynamik auf die Leistungsfähigkeit von Klimamodellen hinsichtlich der Darstellung von Klimavariabilität und damit auf die Güte

von dekadischen Vorhersagen auswirken kann, war die Bereitstellung eines neuen gekoppelten Modellsystems grundlegende Voraussetzung. Die damit verbundenen großen technischen und wissenschaftlichen Herausforderungen konnten nur durch die Förderung dieses Projekts durch das BMBF gelöst werden. Erstmals steht nun ein gekoppeltes Modellsystem zur Verfügung, das für die Meereis-Ozean-Modellkomponente ein unstrukturiertes Gitter verwendet und somit regional verfeinerte Auflösungen in dieser Modellkomponente ermöglicht. Die in Abschnitt ?? dargestellten Ergebnisse zeigen, wie das neue Modellsystem ECHAM6-FESOM mit regional verfeinerter Auflösung erfolgreich für die Untersuchung dekadischer Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit angewendet werden konnte. Basierend auf den innerhalb von TORUS geleisteten Arbeiten wird es nun möglich sein, reale dekadische Hindcasts und Forecasts mit ECHAM6-FESOM im Rahmen anderer Projekte zeitnah umzusetzen.

II.4 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Das zentrale Werkzeug, das im Projekt TORUS entwickelt wurde und auch nach Projektende weiter Verwendung finden wird, ist das neue gekoppelte Modellsystem ECHAM6-FESOM. Hierbei sind erhebliche Arbeiten in die technische Realisierung der Kopplung, in die Validierung der physikalischen Ergebnisse, die Aktualisierung der Atmosphärenkomponente von zuerst ECHAM5.4 auf ECHAM6.1, dann auf ECHAM6.3, den Austausch des Kopplers von OASIS4 auf OASIS3-MCT und insbesondere auf die Optimierung des gekoppelten Systems, der verwendeten Gitter und der Workflows investiert worden.

Im Projekt wurde nachgewiesen, dass das neue Modellsystem ECHAM6-FESOM mit regional verfeinerter Auflösung erfolgreich für die Untersuchung dekadischer Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit angewendet werden kann. Basierend auf den innerhalb von TORUS geleisteten Arbeiten wird es nun möglich sein, reale dekadische Hindcasts und Forecasts mit ECHAM6-FESOM im Rahmen anderer Projekte zeitnah umzusetzen. Zusammen mit den im Projekt erfolgten Untersuchungen und Sensitivitätsstudien zur Klimavariabilität, insbesondere für die arktische Schlüsselregion, können somit wichtige Beiträge zum Einfluss der Arktis auf zukünftige Klimaänderungen in mittleren und niederen Breiten geleistet werden. Darüber hinaus können zuverlässigere Abschätzungen zukünftiger arktischer Klimaänderungen und deren sozio-ökonomische Auswirkungen (z. B. Schiffbarkeit der Nordwest- und Nordostpassagen durch den arktischen Ozean) erwartet werden.

Nach Projektende steht ein Klimamodell bereit, das sich in Performance und physikalischer Aussagekraft nicht nur mit anderen Systemen messen kann, sondern durch die Flexibilität, die mit der Verwendung unstrukturierter Gitter im Ozeanmodell einhergeht, in diversen Anwendungen deutliche Vorteile bietet. Über das Projekt TORUS hinaus wird daher am AWI geplant, mit dem neuen Modellsystem, dann unter dem Namen AWI-CM (AWI Climate Model) an wichtigen Modellvergleichsprojekten, u. a. im Rahmen von CMIP6, teilzunehmen. AWI-CM wird in den kommenden Jahren am AWI das wichtigste Klimamodell im Fachbereich Klimawissenschaften sein.

II.5 Darstellung des Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens/aktuelle Literaturrecherche

Das im Projekt neu entwickelte Klimamodellsystem ECHAM6-FESOM, das für die Ozean-Meereis-Modellkomponente ein unstrukturiertes Gitter verwendet, ist unseres Wissens nach das erste gekoppelte Klimamodell dieser Art und stellt einen wichtigen Entwicklungsschritt auf dem Weg zur Multiskalen-Klimamodellierung dar. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der im Projekt fortlaufend durchgeführten Literaturrecherche zusammengefasst, die für die Modellentwicklung und -validierung und die Untersuchungen zur Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit relevant sind.

Die in ECHAM6-FESOM auftretende Überschätzung von Meereis in der Barentssee und das zeitweise Zufrieren der Labradorsee im Winter, vor allem aber die Unterschätzung der Meereisausdehnung in der Antarktis, sind nach wie vor nicht gelöste Probleme. Der polwärtige Wärmetransport des Ozeans scheint in der Nordhemisphäre zu gering und in der Südhemisphäre zu stark zu sein. Untersuchungen mit dem globalen gekoppelten Klimamodell HadGEM3 von Rae et al. (2014) haben gezeigt, dass höhere Auflösung des Ozeans zu einem stärkeren polwärtigen Wärmetransport, infolge expliziter Auflösung mesoskaliger Wirbel, führen kann, wodurch das Zufrieren der Labradorsee vermieden wird. Gleichzeitig zeigte sich in HadGEM3 aber auch eine deutliche Verschlechterung in der Simulation des antarktischen Meereises (siehe Rae et al., 2014, 2015).

Ein Reihe aktueller Untersuchungen befasst sich mit der Wechselwirkung zwischen Meereis und den vertikalen und meridionalen Salz- bzw. Frischwasserflüssen (Goosse und Zunz, 2014; Huang et al., 2015; Barthélemy et al., 2015; Zunz und Goosse, 2015). Eine zu starke vertikale Durchmischung, infolge zu schwacher Schichtungsstabilität, könnte mitverantwortlich für die zu geringe Eisausdehnung in der Antarktis in ECHAM6-FESOM sein. Zudem scheinen sich Verbesserungen in der Simulation des Frischwassereintrags im Nordatlantik als auch im Südozean positiv auf die dekadische Vorhersagbarkeit auszuwirken (siehe Huang et al., 2015; Zunz und Goosse, 2015).

Eine in globalen gekoppelten Modellen bislang wenig untersuchte Größe ist der Beginn der Schneeschmelze über Meereis. Da das Schmelzen des Meereises im relativ kurzen polaren Sommer erst nach Abschmelzen des Schnees wesentlich wird, spielen der Beginn und die Länge der Schneeschmelzperiode wichtige Rollen für den akkumulierten Eisrückgang im Sommer. Diesbezüglich bietet der aktualisierte Datensatz von Bliss und Anderson (2014) eine neue Möglichkeit der Modellvalidierung hinsichtlich prozessorientierter Verbesserungen von Parametrisierungen.

In dem Artikel von Thoma et al. (2015) wird die auch in TORUS technisch implementierte Initialisierungstechnik der partiellen Kopplung (entwickelt im MiKlip-Projekt MODINI) beschrieben und Ergebnisse für den Hindcast-Skill in MPI-ESM dargelegt. Bei dieser Technik wird im ansonsten frei laufenden gekoppelten Modell der Windstress, der den Ozean (inklusive Meereis) an der Oberfläche antreibt, durch aus Beobachtungen abgeleiteten Windstress (bzw. deren Anomalien) ersetzt. In dem Artikel wird gezeigt, dass die Technik insgesamt ähnlich gut funktioniert, wie die im MiKlip-Modellsystem standardmäßig eingesetzte Technik (Nudging des Ozeans an eine Reanalyse). Nahe dem Äquator jedoch hat die Initialisierung mittels partieller Kopplung deutliche Vorteile (auch im Hindcast-Skill widergespiegelt) dadurch, dass dynamische Ungleichgewichte und damit verursachte Initialschocks vermieden werden.

Literatur

- Barthélemy, A., T. Fichefet, H. Goosse und G. Madec (2015): Modeling the interplay between sea ice formation and the oceanic mixed layer: Limitations of simple brine rejection parameterizations, *Ocean Model.*, 86, 141–152, doi: [10.1016/j.ocemod.2014.12.009](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.12.009).
- Bliss, A. C. und M. R. Anderson (2014): Snowmelt onset over Arctic sea ice from passive microwave satellite data: 1979–2012, *The Cryosphere*, 8, 2089–2100, doi: [10.5194/tc-8-2089-2014](https://doi.org/10.5194/tc-8-2089-2014).
- Goosse, H. und V. Zunz (2014): Decadal trends in the Antarctic sea ice extent ultimately controlled by ice–ocean feedback, *The Cryosphere*, 8, 453–470, doi: [10.5194/tc-8-453-2014](https://doi.org/10.5194/tc-8-453-2014).
- Huang, B., J. Zhu, L. Marx, X. Wu, A. Kumar, Z.-Z. Hu, M. A. Balmaseda, S. Zhang, J. Lu, E. K. Schneider und J. L. Kinter III (2015): Climate drift of AMOC, North Atlantic salinity and arctic sea ice in CFSv2 decadal predictions, *Clim. Dyn.*, 44, 559–583, doi: [10.1007/s00382-014-2395-y](https://doi.org/10.1007/s00382-014-2395-y).
- Rae, J. G. L., H. T. Hewitt, A. B. Keen, J. K. Ridley, J. M. Edwards und C. M. Harris (2014): A sensitivity study of the sea ice simulation in the global coupled climate model, HadGEM3, *Ocean Model.*, 74, 60–76, doi: [10.1016/j.ocemod.2013.12.003](https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.12.003).

- Rae, J. G. L., H. T. Hewitt, A. B. Keen, J. K. Ridley, A. E. West, C. M. Harris, E. C. Hunke und D. N. Walters (2015): Development of the Global Sea Ice 6.0 CICE configuration for the Met Office Global Coupled model, *Geosci. Model Dev.*, 8, 2221–2230, doi: [10.5194/gmd-8-2221-2015](https://doi.org/10.5194/gmd-8-2221-2015).
- Thoma, M., R. Gerdes, R. J. Greatbatch und H. Ding (2015): Partially coupled spin-up of the MPI-ESM: implementation and first results, *Geosci. Model Dev.*, 8, 51–68, doi: [10.5194/gmd-8-51-2015](https://doi.org/10.5194/gmd-8-51-2015).
- Zunz, V. und H. Goosse (2015): Influence of freshwater input on the skill of decadal forecast of sea ice in the Southern Ocean, *The Cryosphere*, 9, 541–556, doi: [10.5194/tc-9-541-2015](https://doi.org/10.5194/tc-9-541-2015).

II.6 Präsentationen und Veröffentlichungen der Ergebnisse des Projekts TORUS

Projekt-Publikationen

- Day, J., S. Tietsche, M. Collins, H. Goessling, V. Guemas, A. Guillory, W. Hurlin, M. Ishii, S. Keeley, D. Matei, R. Msadek, M. Sigmond, H. Tatebe und E. Hawkins (2015): The Arctic Predictability and Prediction on Seasonal-to-Interannual Timescales (APPOSITE) data set, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 8, 8809–8833, doi: [10.5194/gmdd-8-8809-2015](https://doi.org/10.5194/gmdd-8-8809-2015).
- Goessling, H. F., S. Tietsche, J. J. Day, E. Hawkins und T. Jung (2016): Predictability of the Arctic sea-ice edge, *Geophys. Res. Lett.*, 43, L067232, doi: [10.1002/2015GL067232](https://doi.org/10.1002/2015GL067232).
- Juricke, S. und T. Jung (2014): Influence of stochastic sea ice parametrization on climate and the role of atmosphere–sea ice–ocean interaction, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 372, 20130283, doi: [10.1098/rsta.2013.0283](https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0283).
- Juricke, S., H. F. Goessling und T. Jung (2014): Potential sea ice predictability and the role of stochastic sea ice strength perturbations, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 8396–8403, doi: [10.1002/2014GL062081](https://doi.org/10.1002/2014GL062081).
- Rackow, T., H. F. Goessling, T. Jung, D. Sidorenko, T. Semmler, D. Barbi und D. Handorf (2016): Towards multi-resolution global climate modeling with ECHAM6-FESOM. Part II: climate variability, *Clim. Dyn.* submitted.
- Sidorenko, D., T. Rackow, T. Jung, T. Semmler, D. Barbi, S. Danilov, K. Dethloff, W. Dorn, K. Fieg, H. F. Goessling, D. Handorf, S. Harig, W. Hiller, S. Juricke, M. Losch, J. Schröter, D. V. Sein und Q. Wang (2015): Towards multi-resolution global climate modeling with ECHAM6–FESOM. Part I: model formulation and mean climate, *Clim. Dyn.*, 44, 757–780, doi: [10.1007/s00382-014-2290-6](https://doi.org/10.1007/s00382-014-2290-6).

Projekt-Präsentationen

- MiKlip Module B Kick-Off Meeting, Berlin, 13.2.2012: Handorf et al.: TORUS: TOwards Regionally focUsed modelling for decadal climate predictionS. [Vortrag]
- EGU General Assembly, Wien, 22.–27.4.2012: Sidorenko et al.: Coupled FESOM/ECHAM5 setup, strategies and solutions. [Poster]
- EGU General Assembly, Wien, 22.–27.4.2012: Sidorenko et al.: 300 year simulation with the coupled FESOM/ECHAM5 model. [Vortrag]
- 9. Deutsche Klimatagung, Freiburg, 9.–12.10.2012: Sidorenko et al.: Sensitivitätsstudien mit dem gekoppelten Klimamodell ECHAM-FESOM zu Gitterauflösung und Modellparametern. [Vortrag]
- MiKlip Module B Meeting, Hamburg, 15.11.2012: Handorf et al.: TORUS: TOwards Regionally focUsed modelling for decadal climate predictionS. [Vortrag]

- AGU Fall Meeting, San Francisco, 3.–7.12.2012: Semmler et al.: 500 year simulation with the coupled FESOM/ECHAM model. [Poster]
- AGU Fall Meeting, San Francisco, 3.–7.12.2012: Sidorenko et al.: Towards decadal climate predictions using a model system with regional refinement of the Arctic (FESOM/ECHAM). [eingeladener Vortrag]
- Third Internat. Symposium on the Arctic Research, Tokyo, Januar 2013: Semmler et al.: Initial response of reduced ice albedo and increased greenhouse gas concentrations in coupled atmosphere-ocean-sea ice ECHAM-FESOM simulations. [Vortrag]
- MiKlip Statusseminar, Berlin, 14.–15.2.2013: Handorf et al.: TORUS: TOwards Regionally focUsed modelling for decadal climate predictionS. [Poster]
- DKRZ-Nutzerworkshop, Hamburg, 26.2.2013: Handorf et al.: TORUS: TOwards Regionally focUsed modelling for decadal climate predictionS. [Poster]
- Workshop on Stochastic Modelling and Computing for Weather and Climate Prediction, Oxford, März 2013: Juricke et al.: Effects of Stochastic Ice Strength Perturbation on Arctic Finite Element Sea Ice Modeling. [Vortrag]
- EGU General Assembly, Wien, April 2013: Rackow et al.: ENSO-like variability in the coupled climate model ECHAM6-FESOM. [Poster]
- ECMWF-WWRP/THORPEX workshop on Polar Prediction, ECMWF, Reading, UK, 24.–27.6.2013: Juricke: Effects of Stochastic Ice Strength Perturbation on Arctic Finite Element Sea Ice Modeling. [Poster]
- Symposium: Stochastic parameterization in weather and climate models, Universität Bonn, 16.–19.9.2013: Juricke et al.: Stochastic sea ice parameterization and the role of atmospheric coupling. [Vortrag]
- MiKlip Module B Meeting, Bonn, 17.–18.9.2013: Handorf et al.: TORUS: TOwards Regionally focUsed modelling for decadal climate predictionS. [Vortrag]
- MiKlip Statusseminar, Karlsruhe, 12.–14.2.2014: Handorf et al.: TORUS: TOwards Regionally focUsed modelling for decadal climate predictionS. [Vortrag]
- Ocean Science Meeting 2014, Hawaii Convention Center, Honolulu, USA, 23.–28.2.2014: Rackow et al.: Modeling ENSO with ECHAM6-FESOM: Influence of the ocean resolution. [ePoster-Link <http://www.sgmeet.com/osm2014/viewabstract.asp?abstractid=16265>]
- MiKlip Module B Meeting, Berlin, 29.–30.9.2014: Handorf et al.: TORUS: TOwards Regionally focUsed modelling for decadal climate predictionS. [Vortrag]
- MiKlip/SPECS meeting on decadal climate prediction, Offenbach, 23.–25.2.2015: Handorf et al.: TORUS: TOwards Regionally focUsed modelling for decadal climate predictionS. [Poster]
- DKRZ-Nutzerworkshop, Hamburg, 05.–06.10.2015: Handorf et al.: TORUS: TOwards Regionally focUsed modelling for decadal climate predictionS. [Poster]

Abschlussarbeiten

- S. Juricke (2014): Representing uncertainty in global climate models using stochastic sea ice parameterizations. Universität Bremen, Dissertation.
- T. Rackow (2015): An unstructured multi-resolution global climate model: coupling, mean state and climate variability. Universität Bremen, Dissertation.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Towards regionally focused modelling of decadal climate predictions Abschlussbericht: MiKlip–Projekt TORUS	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dörthe Handorf, Dmitry Sidorenko, Thomas Rackow, Dirk Barbi, Wolfgang Dorn, Helge Goessling, Tido Semmler, Sergey Danilov, Stephan Juricke1, Thomas Jung, Wolfgang Hiller, Klaus Dethloff	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2015
	6. Veröffentlichungsdatum 30.04.2016
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung Postfach 120161 27515 Bremerhaven	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 01LP1111A
	11. Seitenzahl 33
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 41
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 15
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Im Rahmen des MiKlip-Projekts TORUS wurde das neue gekoppelte Modellsystems ECHAM6-FESOM entwickelt und über die gesamte Laufzeit des Projekts weiterentwickelt und optimiert. ECHAM6-FESOM ist nach unserem Wissen das weltweit erste gekoppelte Klimamodell, das eine Ozean-Komponente mit unstrukturiertem Gitter beinhaltet. Im Projekt wurde das neue Modellsystem erfolgreich für verschiedene wissenschaftliche Anwendungen eingesetzt. Der Schwerpunkt dieser Untersuchungen lag entsprechend der Zielstellung von TORUS auf der Untersuchung dekadischer Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit und inwieweit deren Darstellung im Modellsystem durch eine Verbesserung der Darstellung arktischer Klimaprozesse beeinflusst wird. Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse von TORUS umfassen: <ul style="list-style-type: none"> (a) Implementierung, Validierung und fortlaufende Optimierung des TORUS-Modellsystems ECHAM6-FESOM. (b) Lange Integrationen des Modellsystems und deren Analyse bzgl. mittlerem Klima und dekadischer Klimavariabilität. (c) Untersuchungen von Mechanismen dekadischer Klimavariabilität und zur potentiellen dekadischen Vorhersagbarkeit. (d) Sensitivitätsstudien zum Effekt von stochastischen Meereis-Parametrisierungen und zur Parametrisierung der Austauschkoefizienten in der atmosphärischen Grenzschicht über Meereis (in Zusammenarbeit mit dem MiKlip-Projekt SPARCS). (e) Vorbereitende Arbeiten zur Durchführung dekadischer Klimaprognosen. Dies umfasst Arbeiten zur Erzeugung von Anfangsbedingungen für dekadische Vorhersagen (in Zusammenarbeit mit dem MiKlip-Projekt MODINI) und die Entwicklung einer Infrastruktur zur effektiven Generierung großer Vorhersage-Ensembles. Basierend auf den innerhalb von TORUS geleisteten Arbeiten wird es nun möglich sein, reale dekadische Hindcasts und Forecasts mit ECHAM6-FESOM im Rahmen anderer Projekte zeitnah umzusetzen. Zusammen mit den im Projekt erfolgten Untersuchungen und Sensitivitätsstudien zur Klimavariabilität, insbesondere für die arktische Schlüsselregion, können somit wichtige Beiträge zum Einfluss der Arktis auf zukünftige Klimaänderungen in mittleren und niederen Breiten geleistet werden.	
19. Schlagwörter Klimamodell mit unstrukturiertem Gitter, dekadische Klimavariabilität und Vorhersagbarkeit, arktische Klimaprozesse	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title Towards regionally focused modelling of decadal climate predictions Final report of MiKlip–project TORUS	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dörthe Handorf, Dmitry Sidorenko, Thomas Rackow, Dirk Barbi, Wolfgang Dorn, Helge Goessling, Tido Semmler, Sergey Danilov, Stephan Juricke1, Thomas Jung, Wolfgang Hiller, Klaus Dethloff	5. end of project 31.10.2015
	6. publication date 30.04.2016
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Alfred Wegener Institute Helmholtz Center for Polar and Marine Research P.O. 120161 27515 Bremerhaven	9. originator's report no.
	10. reference no. 01LP1111A
	11. no. of pages 33
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 41
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 15
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract Within the framework of the MiKlip-project TORUS the new coupled climate model ECHAM6-FESOM has been developed. ECHAM5-FESOM has been further improved and optimized during the course of the project. Employing an unstructured grid for the sea ice-ocean component, ECHAM6–FESOM is the first coupled model of its kind and represents a major step towards multi-resolution climate modeling. Within TORUS, the new model system has been successfully applied for different scientific applications. According to its scientific goals, the focus of the project TORUS concentrates on the study of decadal climate variability and predictability and how their representation within the model system will benefit from an improved representation of Arctic climate processes. The scientific and technical results comprise: (a) The implementation, validation and optimization of the TORUS-model system ECHAM6-FESOM. (b) Long simulations with the model system and their analyses regarding the mean climate and decadal climate variability. (c) Studies of the mechanisms of decadal climate variability and of potential decadal predictability. (d) Sensitivity studies regarding the influence of stochastic sea ice parametrization and regarding the influence of new parametrizations of transfer coefficients in the atmospheric boundary layer over sea ice (in cooperation with the MiKlip-project SPARCS). (e) Preparatory work for decadal climate predictions including the implementation of initialisation strategies for decadal predictions (in cooperation with the MiKlip-project MODINI) and the development of an infrastructure for the efficient generation of large prediction ensembles. Based on the achieved results real decadal hindcasts and forecasts with ECHAM6-FESOM are enabled within the framework of future projects. Together with the sensitivity studies regarding climate variability in particular for the Arctic key region performed within TORUS, important contributions concerning the impact of the Arctic on future climate changes in mid- and low latitudes will be provided.	
19. keywords climate model with unstructured grid, decadal climate variability and predictability, arctic climate processes	
20. publisher	21. price