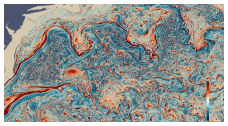


Schlussbericht

Verbundprojekt

ExaOcean
Leistungsverbesserung des ICON-O Ozeanmodells auf heterogenen Exascale-Supercomputern mit Methoden des Maschinellen Lernens

Zuwendungsempfänger	Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich Supercomputing Centre (JSC)
Förderkennzeichen	16ME0682
Laufzeit	10/2022 – 09/2025
Projektleitung	L. Hoffmann, JSC

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Inhaltsverzeichnis

1 Kurze Darstellung des Vorhabens 3

1.1 Aufgabenstellung 3

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung und wissenschaftlicher Stand . . . 4

1.3 Planung und Ablauf 4

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 6

2 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 7

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 9

4 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 9

5 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes 10

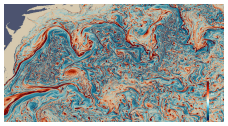
5.1 Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 10

5.2 Wissenschaftliche-technische Anschlussfähigkeit 10

6 Neue projektrelevante FE-Ergebnisse von dritter Stelle 11

7 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen 11

8 Sonstige Literatur 12



1 Kurze Darstellung des Vorhabens

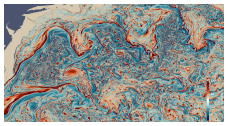
1.1 Aufgabenstellung

Computersimulationen auf Hochleistungsrechnern sind ein unverzichtbares Werkzeug in den Natur- und Ingenieurwissenschaften. Die in vielen Problemen auftretenden, stark unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen übersetzen sich in immer komplexer werdende mathematische Modelle, zu deren numerischer Lösung zunehmend leistungsstärkere Rechnersysteme notwendig sind. Die neueste Generation von Hochleistungsrechnern wie JUPITER am Jülich Supercomputing Centre mit Rechenleistungen im Exascale Bereich erlauben es, Modelle mit nie dagewesener Auflösung zu rechnen und somit völlig neue Einblicke und Erkenntisse zu gewinnen.

Essentiell ist hierbei aber die Entwicklung moderner numerischer Algorithmen, welche die durch die Hardware dieser Systeme bedingten Besonderheiten berücksichtigen. Hierbei stehen insbesondere zwei Herausforderungen im Vordergrund. Zum einen der extreme Grad an Parallelität, den eine Simulationssoftware für die Nutzung solcher Systeme ermöglichen muss, zum anderen die zunehmend heterogene Natur moderner Hochleistungsrechner, welche CPUs, Grafikarten (GPUs) und andere Beschleuniger kombinieren.

Ziel von ExaOcean war es, mittels einer Kombination von klassischen diskreten Algorithmen und Methoden des maschinellen Lernens (ML) den Durchsatz des ICON-O Ozeanmodells, gemessen in simulierten Tagen pro 24h Laufzeit, um mindestens einen Faktor sechs zu verbessern. Über die Laufzeitreduktion hinaus sollte auch gezeigt werden, dass dieser Ansatz durch die Kombination von ML- und gitter-basierten Verfahren die effizientere Nutzung heterogener HPC-Systeme ermöglicht.

Speziell sollten zwei neue algorithmische Ansätze entwickelt werden: ein „parallel spectral deferred correction“ (PSDC) genanntes numerisches Zeitschrittverfahren, welches eine bessere Ausnutzung von Mehrkern-CPUs mittels kleinskaliger Parallelisierung in der Zeit ermöglicht und ein „dynamic super-resolution“ (DSR) Ansatz, welcher Techniken aus der Bildverarbeitung zur ML-gestützten Auflösungsverbesserung für dynamische Simulationen adaptiert. Das Ziel war eine Verbesserung der parallelelen Skalierbarkeit durch PSDC und eine Reduktion des Gesamtrechenaufwands durch DSR dadurch, dass die ML-basierte Korrektur die Verwendung gröberer Gitter ohne Genauigkeitsverlust der Simulation ermöglicht.



1.2 Voraussetzungen zur Durchführung und wissenschaftlicher Stand

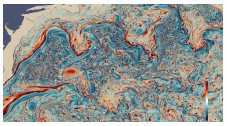
ICON-O ist die Ozeankomponente des operationellen ICON Erdsystemmodells, welches am MPI-M entwickelt und u.a. vom Deutschen Wetterdienst für die operative Wettervorhersage verwendet wird. Im Rahmen des „sub-mescoscale telescope“ Experiments wurden mit ICON-O hochaufgelöste Simulationen der sub-mesoskaligen Wirbel im Nordatlantik durchgeführt [5]. Hierfür waren lokal Auflösungen von circa 600m notwendig, weswegen die Simulationen nur über einen Zeitraum von drei Monaten in akzeptabler Laufzeit möglich waren. Um vergleichbar genaue Simulationen über klimatologisch relevante Zeitskalen zu ermöglichen, zielte ExaOcean auf eine signifikante Verbesserung des Durchsatzes von ICON-O.

Techniken zur „super-resolution“ d.h. zur nachträglichen Verbesserung der Auflösung von Bildaten mittels maschinellem Lernen, sind bereits etabliert und weit genutzt. Bisher gab es aber wenig Versuche, vergleichbare Techniken dynamisch im Rahmen von Simulationen einzusetzen. ExaOcean stütze sich hier auf eine Arbeit von Pathak et al. [6], in welcher ein UNet zu Verbesserung der Genauigkeit der Lösung in einer Simulation zwischen Zeitschritten benutzt wird.

Zeitparallele Verfahren sind ein aktives Forschungsfeld, allerdings liegt der Schwerpunkt auf sogenannten „parallel-across-the-steps“ Methoden, welche versuchen, mehrere Zeitschritte simultan zu lösen [7, 8]. Solche Verfahren ermöglichen potentiell großskalige Parallelität in der Zeit, kämpfen aber mit geringen parallelen Effizienzen sowie der Notwendigkeit, aufwändige Grobgittermodelle zu definieren. Daher fokussierte ExaOcean sich auf sogenannte „parallel-across-the-method“ Ansätze. Solche sind beschränkter in der Menge an Prozessoren die genutzt werden können, dafür kommen sie ohne Grobgittermodelle aus, sind einfacher zu implementieren und liefern deutlich bessere parallele Effizienz. Frühe Versuche, parallele Runge-Kutta Methoden zu finden waren wenig erfolgreich, vor allem aufgrund der ungünstigen Stabilitätseigenschaften dieser Verfahren [9]. Einen neuen Zugang hierzu ermöglichte die Paralleliserung von „spectral deferred corrections“ (SDC), ursprünglich eingeführt von Dutt et al. [10], durch die Verwendung diagonaler Vorkonditionier [11]. In der ursprünglichen Form konvergierten diese parallelen SDC Verfahren allerdings deutlich langsamer als ihre seriellen Gegenstücke und waren daher nur bedingt für den Einsatz in komplexen Simulationscodes wie ICON-O geeignet.

1.3 Planung und Ablauf

Die Realisierung von ExaOcean erfolgte in Form von insgesamt acht miteinander verbundenen Arbeitspaketen, siehe Abbildung 1 (AP8 befasste sich mit der Koordinie-



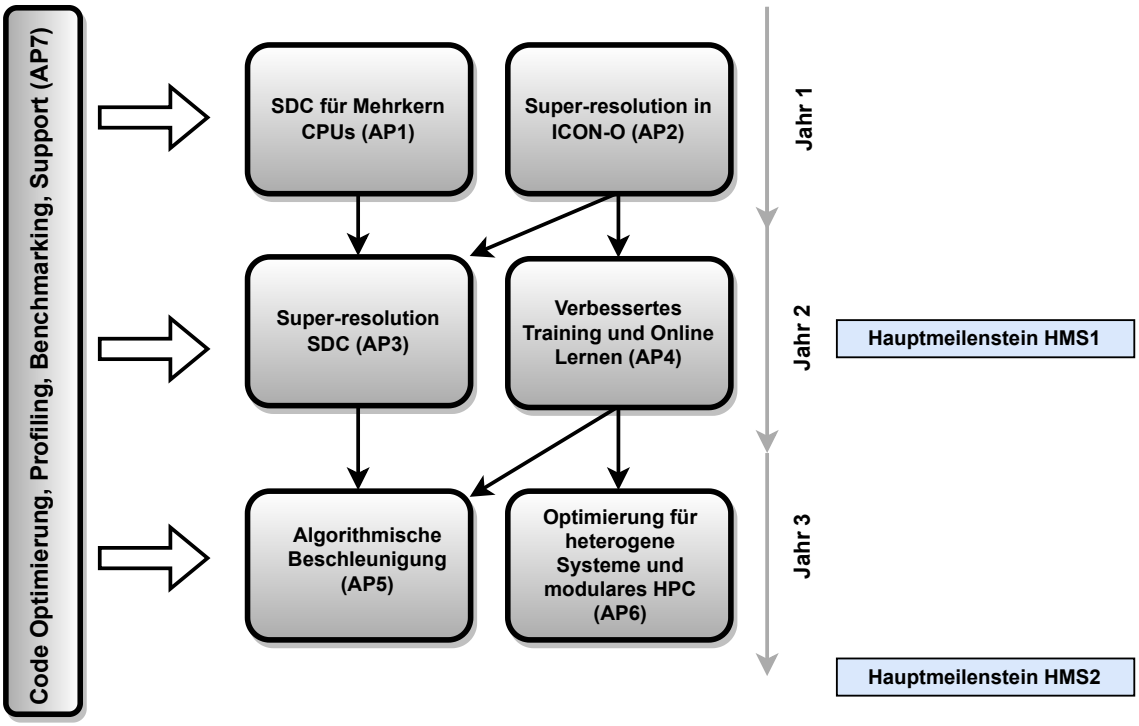
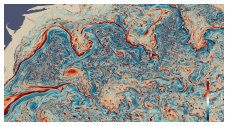


Abb. 1: Abhängigkeiten der Arbeitspakete in ExaOcean.

rung des Projekts und ist in der Grafik nicht dargestellt). Die Arbeitspakete AP1 und AP5 entwickelten und verbesserten das parallele SDC Verfahren. Arbeitspakete AP2 und AP4 lieferten den Ansatz zur „dynamic super-resolution“ (DSR) zur Reduktion der notwendigen Gitterauflösung. AP3 zielte auf die Verbindung beider Ansätze und auf gemeinsame Tests in ICON-O. Im Rahmen von AP6 sollte die Implementierung für heterogene Beschleunigersysteme optimiert und Möglichkeiten ausgelotet werden, die für die DSR notwendigen neuronalen Netze zur Laufzeit im Rahmen von online Training weiter zu verbessern. AP7 wurde vom Jülich Supercomputing Centre geleitet und lieferte durchgehend über die gesamte Projektlaufzeit wertvolle Unterstützung bei der Portierung von Code auf die Systeme in Jülich, beim Benchmarking und Profiling, bei der Einrichtung von Continuous Integration pipelines und ähnlichen Problemstellungen. Im Rahmen von AP8 (nicht in Abbildung 1 dargestellt) fand die Koordinierung des Projekts statt.

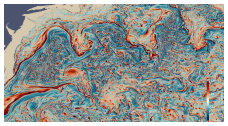
Das Jülich Supercomputing Centre (JSC) war im Verbundvorhaben federführend für das Arbeitspaket AP7 „Code Optimierung, Profiling, Benchmarking, Support“ verantwortlich und unterstützte darüber hinaus AP6 sowie AP8. Die Arbeiten des JSC konzentrierten sich auf die Bereitstellung und Optimierung des ICON-O-



Modells auf aktuellen und zukünftigen HPC-Plattformen des Forschungszentrums Jülich sowie auf die Vorbereitung der Portierung auf das Exascale-System JUPITER.
Ein wesentlicher Beitrag bestand in der Einrichtung und Pflege von Entwicklungs- und Testumgebungen auf JUWELS-Cluster, JUWELS-Booster und dem JEDI-System (Entwicklungsplattform für JUPITER). Auf diesen Plattformen führte das JSC umfassende Profiling- und Benchmark-Analysen durch, unter anderem OMIP-R2B6 Benchmarking auf A100- und GH200-GPUs. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die zukünftige Ausführung von ICON-O auf den GPU-Knoten von JUPITER.
Parallel dazu wurden die bestehenden CI/CD-Infrastrukturen zum Testen von ESM-Anwendungen am JSC weiter ausgebaut. Das JSC erweiterte den ESM-Buildbot um automatisierte tägliche Benchmark-Läufe und automatische Performanceberichte und integrierte zusätzliche Buildbot-Worker auf JEDI, um zukünftige Multi-Architektur-Pipelines zu unterstützen. Damit wurde die bestehende ICON-CI/CD-Kette, die das JSC seit 2023 gemeinsam mit DKRZ auf JUWELS-Systeme erweitert hat, funktional gestärkt und breiter aufgestellt.
Zur Unterstützung der wissenschaftlichen Arbeiten im Projekt generierte das JSC zwei umfangreiche Datensätze (SMT-Simulation und Barokline-Simulation) auf den HPC-Systemen des JSC. Diese Daten wurden qualitätsgeprüft und den Verbundpartnern zur weiteren Analyse und für ML-Training bereitgestellt. Für die Durchführung der umfangreichen Simulationen wurden mehrfach Rechenzeit- und Datenprojekte in Jülich beantragt und erfolgreich eingeworben.
Die Meilensteine HMS1 und HMS2 wurden durch koordinierte Testläufe und Optimierungsmaßnahmen auf den Jülicher Systemen unterstützt. Darüber hinaus präsentierte das JSC den Projektstand auf dem jährlichen NIC-Symposium und war kontinuierlich in die Abstimmung mit den Verbundpartnern eingebunden.
Insgesamt konnte das JSC während der Projektlaufzeit wesentliche Beiträge zur Vorbereitung von ICON-O auf heterogene GPU/CPU-Architekturen leisten, die Portierung auf Exascale-Systeme vorbereiten und die operative Stabilität und Reproduzierbarkeit der Entwicklung durch CI/CD-Mechanismen verbessern.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Partner an der Technischen Universität Hamburg (TUHH), dem Max-Planck Institut für Meteorologie (MPI-M), Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) und Jülich Supercomputing Centre (JSC) haben im Rahmen von ExaOcean eng zusam-



mengearbeitet.

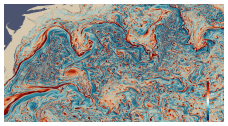
Die Zusammenarbeit umfasste regelmäßige technische Abstimmungen, gemeinsame Profiling- und Benchmark-Aktivitäten sowie Unterstützung bei der Vorbereitung der Meilensteine HMS1 und HMS2, insbesondere bei der Portierung und Optimierung von ICON-O auf den HPC-Systemen des JSC.
Mit dem DKRZ stimmte das JSC zudem die Erweiterung der ICON-CI/CD-Infrastruktur ab und integrierte Buildbot-Worker auf JUWELS und JEDI, um plattformübergreifende Tests zu ermöglichen. Auch für die im Projekt erzeugten Datensätze bestand ein kontinuierlicher Austausch zur Datenqualität und -bereitstellung mit den wissenschaftlichen Partnern.
Insgesamt verlief die Zusammenarbeit reibungslos und ermöglichte eine effiziente Nutzung der JSC-Ressourcen sowie eine effektive technische Unterstützung der Verbundpartner. Darüber hinaus erfolgte keine weitere Zusammenarbeit mit externen Stellen außerhalb des Projektverbunds.

2 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das im Projektantrag von ExaOcean definierte Hauptziel war es, *durch eine Kombination von effizienteren Algorithmen, reduzierter räumlicher Auflösung aufgrund der ML-Korrektur, verbesserter Skalierbarkeit und besserer Ausnutzung von Beschleunigern den Durchsatz von ICON-O um mindestens einen Faktor 6 zu verbessern.*

Die hierfür geplanten methodischen Neuerungen wurden erfolgreich entwickelt und getestet [1–3]. Aufgrund von Beschränkungen in der implementierten hybriden Raum-Zeit-Parallelisierung war es nicht möglich, Testläufe für das volle „sub-mesoscale telescope“ Problem durchzuführen, welches den gesamten Nordatlantik simuliert. Stattdessen wurde als Benchmark eine barokline Instabilität in einem Kanal gewählt. Diese besitzt zwar eine einfachere Geometrie, bildet aber alle auch in der vollen Simulation relevanten physikalischen Prozesse ab.

Das Hauptziel (Hauptmeilenstein HMS2) von ExaOcean, eine Erhöhung des Durchsatzes von ICON-O, konnte erfolgreich verwirklicht werden, auch wenn der angestrebte Faktor 6 nicht erreicht wurde. Aufgrund der verspäteten Indienststellung des JUPITER ExaScale Systems wurden viele Skalierungstests auf dem DKRZ System Levante durchgeführt. Trotzdem gelang zum Ende von ExaOcean eine erfolgreiche Portierung auf JUPITER und erste, wenn auch in der Anzahl an Rechenknoten noch begrenzte, Skalierungstests.



Das JSC erzielte im Rahmen des Projekts wesentliche Fortschritte bei der Vorbereitung von ICON-O auf aktuelle und zukünftige HPC-Architekturen. Ein zentrales Ergebnis war die erfolgreiche Bereitstellung stabiler Entwicklungs- und Ausführungsumgebungen auf JUWELS-Cluster, JUWELS-Booster und dem JEDI-System. Auf diesen Plattformen wurden umfangreiche Profiling- und Benchmark-Analysen durchgeführt, insbesondere für NVIDIA A100- und GH200-GPUs. Diese Arbeiten lieferten die technische Grundlage für die zukünftige Ausführung von ICON-O auf den GPU-Knoten des Exascale-Systems JUPITER.

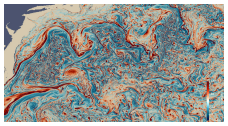
Ein weiterer Ergebnisbereich betrifft die Weiterentwicklung der CI/CD-Infrastruktur für Erdsystemmodelle. Das JSC erweiterte den ESM-Buildbot um automatisierte tägliche Benchmark-Läufe und Performanceberichte und integrierte zusätzliche Buildbot-Worker auf JEDI. Dadurch konnte die ICON-CI/CD-Kette auf eine breitere Architekturvielfalt ausgeweitet und die Reproduzierbarkeit der Modellentwicklung deutlich verbessert werden.

Zur Unterstützung der wissenschaftlichen Arbeiten wurden auf den JSC-Systemen zwei umfangreiche Datensätze erzeugt (SMT-Simulation und Barokline-Simulation) und den Projektpartnern bereitgestellt. Diese Datensätze dienen sowohl der wissenschaftlichen Analyse als auch dem Training von Machine-Learning-Modellen und waren für mehrere Arbeitspakete im Verbund essentiell.

Schließlich unterstützte das JSC die Erreichung der Meilensteine HMS1 und HMS2 durch koordinierte Testläufe, Optimierungsmaßnahmen und die Bereitstellung der erforderlichen Rechen- und Datenressourcen. Die im Projekt erzielten Ergebnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die Vorbereitung von ICON-O auf den Einsatz auf heterogenen Exascale-Systemen und stärken langfristig die Leistungsfähigkeit der Modellierungs- und CI/CD-Infrastruktur am JSC.

Die Ziele des JSC wurden im Projekt weitgehend erreicht. ICON-O wurde erfolgreich auf den JSC-Systemen bereitgestellt, getestet und optimiert; die durchgeführten Profiling- und Benchmark-Analysen lieferten die erwarteten Leistungsdaten für aktuelle GPU-Architekturen. Die Arbeiten zur Vorbereitung der Portierung auf JUPITER wurden umgesetzt, konnten jedoch aufgrund der bis Projektende noch ausstehenden Systemverfügbarkeit nicht vollständig abgeschlossen werden.

Die geplante Erweiterung der CI/CD-Infrastruktur wurde vollständig erreicht und teilweise über den ursprünglichen Umfang hinaus verbessert (automatisierte Benchmarks, zusätzliche Buildbot-Worker). Auch die im Projekt vorgesehenen Datensätze wurden erzeugt, qualitätsgesichert und den Partnern bereitgestellt.



Insgesamt wurden die Projektziele des JSC weitgehend erfüllt. Offene Punkte sind ausschließlich auf externe, systembedingte Verzögerungen zurückzuführen.

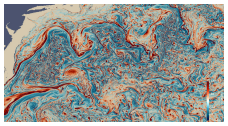
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die in diesem Projekt durchgeführten Arbeiten stellten einen erheblichen Mehraufwand für alle Partner dar, welcher nur mit Hilfe zusätzlicher Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zu bewältigen war. Entsprechend wurde die Förderung zum großen Teil für die Finanzierung von wissenschaftlichen Mitarbeitenden verwendet, welche die vorgestellten Entwicklungen durchgeführt haben. Der Rest der Zuwendung wurde für Reisen von und zu Kooperationspartnern sowie für den Besuch von Konferenzen und Workshops verwendet, um die wissenschaftlichen Resultate und das Projekt selbst vorzustellen.

Die vom JSC im Projekt erbrachten Arbeiten waren notwendig, um ICON-O für den Einsatz auf modernen GPU-Systemen vorzubereiten, Leistungsengpässe zu identifizieren und die technische Grundlage für eine Portierung auf das Exascale-System JUPITER zu schaffen. Die hierfür erforderlichen Aktivitäten, insbesondere die umfangreichen Profiling- und Benchmark-Analysen, die Weiterentwicklung der CI/CD-Infrastruktur sowie die enge technische Zusammenarbeit mit den Modellentwicklern, gehen deutlich über den üblichen Umfang der regulären Anwenderunterstützung auf den HPC-Systemen in Jülich hinaus.
Aufgrund der breiten technischen Expertise des JSC in den Bereichen Performance-Engineering, GPU-Optimierung und HPC-Softwareinfrastruktur konnte eine zentrale, für den Projektfortschritt wesentliche technische Unterstützung geleistet werden. Diese Arbeiten wären ohne die Projektförderung in diesem Umfang nicht realisierbar gewesen, da sie erhebliche Entwicklungs- und Integrationsaufwände erforderten, die über den Normalbetrieb hinausgehen. Umfang und Tiefe der geleisteten Arbeiten waren daher sowohl notwendig als auch angemessen, um die Projektziele zu erreichen.

4 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Dieser Abschnitt enthält Angaben zu den aufgewendeten Personal- und Reisekosten im Verbundvorhaben ExaOcean.



Kostenart	2022	2023	2024	2025	Summe
Personalkosten	0,00	51.165,38	56.261,18	50.119,49	157.546,05
Reisekosten	0,00	1.126,13	611,28	544,74	2.282,15
Sonstiges	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	0,00	52.291,51	56.872,46	50.664,23	159.828,20

Tab. 1: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises (in EUR)

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises des JSC sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Personalmittel wurden zur Finanzierung von Herrn Dr. Yen-Sen Lu eingesetzt, der die Projektarbeiten hauptverantwortlich durchgeführt hat. In der ursprünglichen Projektplanung war zusätzlich der Einsatz studentischer Hilfskräfte vorgesehen; aufgrund fehlender geeigneter Kandidaten konnte dies jedoch nicht umgesetzt werden. Die hierfür vorgesehenen Mittel wurden daher sachgerecht in Personalmittel für Herrn Dr. Lu umgewandelt. Die Reisekosten entfielen im Wesentlichen auf die Teilnahme an den regelmäßigen Projekttreffen in Hamburg sowie weitere notwendige Abstimmungen im Verbund.

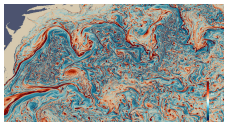
5 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

5.1 Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Das JSC hat keine wirtschaftliche Verwertung geplant.

5.2 Wissenschaftliche-technische Anschlussfähigkeit

High-Performance Computing (HPC) gehört heute in vielen wissenschaftlichen Disziplinen zu den grundlegenden Forschungsmethoden. Systeme wie JUPITER am Jülich Supercomputing Centre erreichen inzwische Exa-Flop Performanz (mindestens 10^{18} Operationen pro Sekunde). Um die Rechenleistung solcher System aber auch in Anwendungen nutzbar zu machen, sind effiziente mathematische Verfahren notwendig, die den notwendigen Grad in Parallelität bereitstellen können. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei dar, dass die Rechenleistung solcher Maschinen vor allem auf dem massiven Einsatz von Grafikkarten (GPUs) beruht, welche durch die typischen gitter-basierten Methoden bei der numerischen Lösung von Differentialgleichungen oft nur unzureichend ausgelastet werden können. Techniken des maschinellen Lernens hingegen eignen sich aufgrund ihrer mathematischen Struktur sehr gut für GPUs. Die in ExaOcean entwickelten Methode zur verbesserten parallelen Skalierbarkeit



und Integration von ML-basierten Techniken sind geeignet, eine bessere Ausnutzung von Höchstleistungsrechnern zu ermöglichen. Die für ICON-O demonstrierten entwickelten und getesteten Techniken lassen sich potentiell auf eine große Klasse von auf Differentialgleichungen basierten Modellen erweitern.

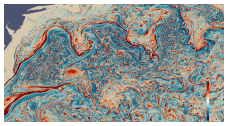
Die im Projekt aufgebauten technischen Entwicklungen am JSC besitzen eine hohe wissenschaftlich-technische Anschlussfähigkeit. Die erzielten Optimierungen und Benchmark-Ergebnisse für ICON-O auf GPU-Architekturen bilden eine direkte Grundlage für die weitere Portierung und Skalierung des Modells auf das Exascale-System JUPITER. Mit der Verfügbarkeit der finalen GPU- und CPU-Infrastruktur können die begonnenen Arbeiten ohne inhaltliche Brüche fortgeführt und zu einer produktiven Exascale-Version von ICON-O weiterentwickelt werden.
Auch die im Projekt erweiterten CI/CD-Werkzeuge – insbesondere automatisierte Benchmark-Läufe, Performanceberichte und Multi-Architektur-Buildbot-Worker – werden am JSC dauerhaft betrieben und fließen in die langfristige Software-Qualitätssicherung für Erdsystemmodelle ein. Sie stärken die Fähigkeit, ICON und verwandte Anwendungen effizient auf neuen HPC-Architekturen bereitzustellen.
Die erzeugten Datensätze (SMT- und Barokline-Simulationen) besitzen ebenfalls nachhaltige Anschlussfähigkeit, da sie für weiterführende wissenschaftliche Analysen, Validierungsstudien und ML-Ansätze genutzt werden können. Insgesamt leisten die Projektergebnisse einen wichtigen Beitrag zur Vorbereitung zukünftiger Forschung im Bereich hochskalierbarer Ozeanmodellierung und zur Exascale-Readiness von ICON-O.

6 Neue projektrelevante FE-Ergebnisse von dritter Stelle

Es sind keine für das Teilprojekt relevanten Ergebnisse von dritter Stelle bekannt.

7 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des JSC wurden im Rahmen des NIC Symposiums 2025 am Forschungszentrum Jülich öffentlich präsentiert [4]. In diesem Beitrag wurden die im Projekt erzielten Fortschritte zur GPU-basierten Optimierung von ICON-O, erste Benchmark-Ergebnisse sowie die Arbeiten zur kontinuierlichen Leistungsüberwachung mittels CI/CD vorgestellt und erörtert.



Erfolgte Veröffentlichungen

[1] Čaklović, G., Lunet, T., Götschel, S. & Ruprecht, D. Improving efficiency of parallel across the method spectral deferred corrections. *SIAM Journal on Scientific Computing* **47**, A430–A453 (2025). URL https://doi.org/10.1137/24M1649800.

[2] Freese, P., Götschel, S., Lunet, T., Ruprecht, D. & Schreiber, M. Parallel performance of shared memory parallel spectral deferred corrections. *The International Journal of High Performance Computing* (2025). URL http://arxiv.org/abs/2403.20135v1. In press.

[3] Witte, M. *et al.* Dynamic deep learning based super-resolution for the shallow water equations. *Machine Learning: Science and Technology* **6**, 015060 (2025). URL https://dx.doi.org/10.1088/2632-2153/ada19f.

[4] Freese, P. *et al.* ExaOcean – Improving Performance of the ICON-O Ocean model. In *NIC Symposium*, FZJ-2025-INF-8 (Jülich Supercomputing Center, 2025). Poster presentation.

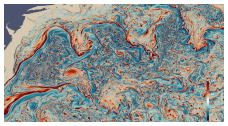
Geplante Veröffentlichungen

Mittelfristig ist geplant, die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zur Performance-Analyse und GPU-Portierung von ICON-O unter Federführung des DKRZ in Form einer wissenschaftlichen Veröffentlichung aufzubereiten. Dies hängt jedoch von der allgemeinen operationellen Verfügbarkeit von JUPITER ab, die derzeit ab Anfang 2026 erwartet wird.

8 Sonstige Literatur

[5] Hohenegger, C. *et al.* Icon-sapphire: simulating the components of the earth system and their interactions at kilometer and subkilometer scales. *Geoscientific Model Development* **16**, 779–811 (2023). URL https://gmd.copernicus.org/articles/16/779/2023/.

[6] Pathak, J. *et al.* Using machine learning to augment coarse-grid computational fluid dynamics simulations (2020). URL https://arxiv.org/abs/2010.00072. 2010.00072.



[7] Lions, J.-L., Maday, Y. & Turinici, G. A "parareal̈n time discretization of PDE's. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series I - Mathematics* **332**, 661–668 (2001). URL http://dx.doi.org/10.1016/S0764-4442(00)01793-6.

[8] Gander, M. J. & Lunet, T. *Time Parallel Time Integration.* SIAM Collection (SIAM, 2024). URL https://epubs.siam.org/doi/book/10.1137/1.9781611978025.

[9] Iserles, A. & Nørsett, S. On the theory of parallel runge—kutta methods. *IMA Journal of numerical Analysis* **10**, 463–488 (1990).

[10] Dutt, A., Greengard, L. & Rokhlin, V. Spectral deferred correction methods for ordinary differential equations. *BIT Numerical Mathematics* **40**, 241–266 (2000).

[11] Speck, R. Parallelizing spectral deferred corrections across the method. *Computing and Visualization in Science* (2018). URL https://doi.org/10.1007/s00791-018-0298-x.