

<b>Sachbericht Verwendungsnachweis (Teil II) - 16ME0601</b>	
<b>Zuwendungsempfänger</b>	ParTec AG
<b>Verbundprojekt</b>	<b>EECLiPs</b> – Energy Efficient Climate Predictions
<b>Förderkennzeichen</b>	16ME0601
<b>Bewilligungszeitraum</b>	01.09.2022 – 31.08.2025

## Teil II: Eingehende Darstellung

Das Ziel des EECLiPs-Gesamtprojekts bestand darin, einen Beitrag zu einer energieeffizienteren Klimaforschung im Bereich der computergestützten Simulation zu leisten. Dabei sollte untersucht werden, inwieweit sich die Analyse des Klimawandels auf Hoch- und Höchstleistungsrechnern, deren Betrieb viel Energie erfordert, durch die Wahl der Hardwarearchitektur sowie die softwareseitige Abbildung des jeweiligen Klimamodells mit der energiepolitischen Zielsetzung einer effizienten Ressourcennutzung in Einklang bringen lässt.

### Allgemeine Projektziele

Generelles Ziel der computergestützten Klimaforschung ist es, den Klimawandel und seine Folgen besser zu verstehen und fundierte Bewertungen von Anpassungsstrategien zu ermöglichen. Dabei kommen hochmoderne Hochleistungsrechner zum Einsatz, deren Energiebedarf jedoch beträchtlich ist. Um diesen Widerspruch zu lösen, wurde im Rahmen des EECLiPs-Projekts ein abgestimmtes Co-Design von HPC-Hardware und Software umgesetzt, das eine energieeffiziente Durchführung von Klimasimulationen erlaubt.

Im Fokus stand dabei die optimale Lastverteilung des Klima- und Wettermodells ICON unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs – ein Aspekt, der bislang auf heterogener Hardware in dieser Breite kaum erforscht wurde. Das Projekt mündete in die Konzeption und Installation eines heterogenen Testclusters als Proof-of-Concept-System, das gezielt auf spezialisierte Architekturen setzt, die eine Reduktion des Energieverbrauchs für jeweils bestimmte Teile des ICON-Modells versprechen. Bewertungsmaßstäbe waren dabei sowohl die Zeit bis zur Lösung (*time-to-solution*) als auch der Energieverbrauch bis zur Lösung (*energy-to-solution*), die als Zielgrößen stets gemeinsam betrachtet wurden, um sowohl nachhaltige als auch weiterhin leistungsfähige Klimasimulationen zu ermöglichen.

Für die gezielte Analyse der jeweiligen Stärken und Schwächen verschiedener Architekturen für einzelne Modellkomponenten anhand dieser beiden Zielgrößen war zum einen eine wohlüberlegte Auswahl an anzuschaffenden Knotenplattformen für den Testcluster zu treffen. Zudem war sicherzustellen, dass dieser heterogene Verbund sich am Ende als Einheit und mit Interaktion über Knotengrenzen hinweg betreiben und sich die ICON-Komponenten gezielt auf die verschiedenen Clusterknoten verteilen lassen. Hierzu war bereits in der Antragsstellung die Verwendung von ParaStation Modulo, einem Softwareprodukt der ParTec AG, vorgesehen, das in der Lage ist, Softwarekomponenten und darauf basierende parallele Prozesse in heterogenen und modularen Umgebungen zu orchestrieren und zu verwalten.

Das EECLiPs-Projekt zeichnete sich insbesondere dadurch aus, dass mit ICON eine reale Anwendung mit hoher gesellschaftlicher Relevanz untersucht wurde, die als einziges in Deutschland aktiv weiterentwickelte, vollgekoppelte Erdsystemmodell zugleich die Grundlage für das operationelle Vorhersagesystem des Deutschen Wetterdienstes bildet. ICON kommt darüber hinaus in mehreren paneuropäischen Forschungsinitiativen wie NextGEMS und DestinE zum Einsatz, um die Möglichkeiten der ersten Exascale-Hochleistungsrechner in Europa gezielt nutzen zu können. Und auch in den durch das SCALEXA-Programm des BMBF (heute BMFTR) geförderten nationalen Forschungsprojekten ExaOcean und IFCES2 stand es jüngst im Mittelpunkt, wobei in letzterem ebenfalls ParaStation Modulo als Middleware zum Einsatz kam und dabei gezielt auf die Bedürfnisse von ICON zugeschnitten wurde.

## Aufbau und Struktur des Gesamtvorhabens

Das Gesamtprojekt war in fünf Arbeitspakete (AP) unterteilt, die zum Erreichen des Projektziels eng miteinander verknüpft waren. Folgende Struktur wurde dem Projekt zugrunde gelegt:

### AP1: Untersuchung der ICON-Setups

- Leitung: DKRZ (*Deutsches Klimarechenzentrum*)
- Ziel: Analyse und Optimierung der Energieeffizienz von ICON-Komponenten auf verschiedenen HPC-Architekturen
- Aufgaben: Definition und Portierung von Codesegmenten, Messung und Optimierung der Energieeffizienz
- Ergebnisse: Zuordnung der ICON-Komponenten zu den jeweils energieeffizientesten Architekturen

### AP2: Tools zur Messung der Energieeffizienz

- Leitung: TUD-ZIH (*Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen der TU Dresden*)
- Ziel: Weiterentwicklung existierender Monitoring-Infrastruktur für heterogene Systeme
- Aufgaben: Entwicklung einer einheitlichen Messinfrastruktur durch Erweiterungen bestehender Tools
- Ergebnisse: Bereitstellung von Tools zur Analyse und Optimierung der Energieeffizienz

### AP3: Aufbau eines heterogenen Testclusters

- Leitung: ParTec (*ParTec AG*)
- Ziel: Auswahl, Installation und Betrieb eines heterogenen Testclusters
- Aufgaben: Auswahl geeigneter Hardware, Definition von Messschnittstellen, Installation und Wartung des Clusters, Schulung der Partner als Nutzer des Clusters
- Ergebnisse: Stabiler Betrieb des Testclusters zur Durchführung von Experimenten in einer überwachten und reproduzierbaren Testumgebung

### AP4: Umsetzung eines energieeffizienten HPC-Systems

- Leitung: DKRZ
- Ziel: Implementierung eines energieeffizienten Modells für Klimasimulationen auf einem heterogenen HPC-System
- Aufgaben: Erstellung eines Prototyps, Entwicklung von Kommunikationsschnittstellen, Evaluierung des Systems
- Ergebnisse: Integration der ICON-Komponenten in ein Gesamtsystem und Messung der Energieeffizienz

### AP5: Projektmanagement

- Leitung: DKRZ, TUD-ZIH, ParTec
- Ziel: Koordination, Berichterstattung, Verbreitung und Verwertung der Ergebnisse
- Aufgaben: Administrative Aufgaben, Veröffentlichung von Ergebnissen

- Ergebnisse: Erfolgreiche Koordination und Kooperation aller Projektpartner, fristgerechte Einreichung aller Berichte, Nachhaltige Verstetigung der Projektinhalte

ParTec war bei diesen fünf Arbeitspaketen mit technischen Beiträgen insbesondere in AP3 und AP4 sowie mit Eigenbeitrag in AP5 involviert.

## Aufgabenstellung des Teilvorhabens von ParTec

ParTec spielte eine zentrale Rolle im Projekt und hat entscheidend zur technischen Umsetzung und erfolgreichen Durchführung des Projekts beigetragen. Die Hauptaufgaben von ParTec umfassten:

**Leitung des Arbeitspakets AP3.** ParTec war maßgeblich für den Aufbau des heterogenen Testclusters in AP3 verantwortlich. Die damit verbundene Aufgabenstellung umfasste die Auswahl geeigneter Hardwareplattformen, die Beratung zur Hardwareinstrumentierung für Energiemessungen sowie die Installation, Konfiguration und Wartung des Testclusters. Darüber hinaus unterstützte ParTec die Projektpartner bei der Nutzung der ParaStation Modulo Software Suite durch gezielte Anleitung und technischen Support.

**Technische Expertise.** ParTec steuerte als weitere Kernaufgabe seine umfassende Erfahrung im Bereich modularer Supercomputerarchitekturen zum Projekt bei. Hierzu gehörten die Analyse von Hardwarearchitekturen und Schnittstellen, die Beratung zur modularen Integration heterogener Komponenten sowie die Unterstützung der Projektpartner bei der Verwaltung und dem Betrieb der heterogenen Hardware inklusive der diese verbindenden Softwareschichten.

**Softwareentwicklung und Anpassung.** Im Bereich Systemsoftware übernahm ParTec die Aufgabe, die ParaStation Modulo Software Suite an die Anforderungen des heterogenen Testclusters sowie seinen energieeffizienten Betrieb anzupassen. Dazu zählten neben Konfigurationsarbeiten im Bereich des bereits erwähnten technischen Supports auch die bedarfsgerechte Modifikation der Systemsoftware entsprechend den Projektzielen.

**Integration und Evaluierung.** Als weitere Aufgabe unterstützte ParTec die Integration der Ergebnisse aus den verschiedenen Arbeitspaketen in ein energieeffizientes HPC-System und trug zur Evaluierung des Testclusters bei.

**Projektmanagement und Verbreitung.** ParTec beteiligte sich an administrativen Aufgaben, der Außendarstellung des Projekts sowie der Verwertung der Ergebnisse, indem gewonnene Erkenntnisse in das firmeneigene Wissensportfolio einfließen.

Zur Adressierung dieser Aufgabenstellungen standen ParTec insgesamt 36 Personenmonate (PM) an bewilligtem Arbeitsaufwand zur Verfügung, wovon 32 PM auf AP3 und 4 PM auf AP4 entfielen. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gibt die ursprünglich geplante Verteilung des Arbeitsaufwands über die Einzelaufgaben und die Quartale des Projekts wieder. Dass ParTec am Ende der Projektlaufzeit von 36 Monaten nicht alle beantragten Mittel in vollem Umfang ausschöpfen konnte, lag insbesondere darin begründet, dass die geplanten Arbeiten zur Anleitung und Unterstützung beim Umgang mit ParaStation Modulo sowie die erforderlichen Anpassungsarbeiten an dieser Software deutlich geringer ausfielen als zunächst angenommen.

AP	Thema	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
<b>AP3: 32 PMs</b>		<b>Aufbau eines heterogenen Testclusters</b>											
AP3.a: 6 PMs	Auswahl der geeigneten heterogenen Plattformen und der Systemarchitektur	2,5	1,5	1,5	0,5								
AP3.b: 6 PMs	Beratung zur Hardware-Instrumentierung für Energiemessungen	1,0	2,0	1,5	1,0	0,5							
AP3.c: 10 PMs	Installation, Konfiguration und Wartung des heterogenen Testclusters					2,0	2,5	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5
AP3.d: 10 PMs	Anleitung und Unterstützung zu ParaStation Modulo mit Schwerpunkt auf ICON und dem Testcluster					0,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	0,5	0,5
<b>AP4: 4 PMS</b>		<b>Umsetzung eines energieeffizienten HPC-Systems</b>											
AP4.a: 1 PM	Erstellung eines Prototyps	0,5	0,5										
AP4.b: 2 PMs	Schnittstelle für die Kommunikation in heterogener Umgebung							0,5	0,5	0,5	0,5		
AP4.c: 1 PM	Evaluierung des Testclusters											0,5	0,5
<b>AP5</b>		<b>Projektmanagement</b>											
AP5.a	Administration	Eigenbeitrag											
AP5.b	Verbreitung	Eigenbeitrag											
AP5.c	Verwertung	Eigenbeitrag											

Abbildung 1: Balkenplan mit Arbeitspaketen und ursprünglich vorgesehener PM-Verteilung für ParTec

## Maßgebliche Aktivitäten von ParTec

In der Anfangsphase des Projekts konzentrierten sich die Arbeiten von ParTec auf die Auswahl geeigneter heterogener Plattformen zur Architekturdefinition des heterogenen Testclusters. Dazu nahm ParTec an dedizierten Telefonkonferenzen zur Besprechung möglicher Hardwaredefinitionen mit den beteiligten Projektpartnern teil und arrangierte mehrere interne Treffen zur Abstimmung von Hard- und Softwareaspekten hinsichtlich der vorzuschlagenden Clusterarchitektur. So konnte bereits beim virtuellen Kick-off-Meeting im November 2022 eine skizzenhafte, aber breit gefächerte Übersicht an möglichen Hardwarekomponenten zur Zusammenstellung des heterogenen Testclusters von ParTec zur weiteren Diskussion präsentiert werden.

Basierend auf dieser Vorauswahl und nach regelmäßigen Arbeitstreffen zur Konkretisierung der Zusammenstellung in den Folgemonaten wurden dann beim Jahrestreffen im Mai 2023 von ParTec insgesamt vier verschiedene Beschaffungspläne jeweils mit einer unterschiedlichen Auswahl an Technologien für den Aufbau des Testclusters vorgestellt. Bei der Zusammenstellung und der anschließenden Diskussion der Beschaffungsvorschläge wurden insbesondere die Verfügbarkeit und der Budgetrahmen sowie die Basisanforderungen von ICON zusammen mit der anvisierten Energieeffizienz berücksichtigt. Basierend auf diesen Vorschlägen wurden in den Folgemonaten passende Anbieter kontaktiert, die entsprechenden Beschaffungspläne verfeinert und die ersten Beschaffungen nach Diskussion in den monatlichen Online-Projekttreffen durch das DKRZ durchgeführt.

Die Installation der Software auf den Clusterknoten erfolgte dann direkt im Anschluss an die Bereitstellung der Infrastruktur. Zunächst übernahm das DKRZ hierbei die grundlegende Betriebssystemeinrichtung, anschließend war ParTec dann für die Installation und Konfiguration der ParaStation Modulo Software Suite als zentrale Clustermiddleware verantwortlich. Durch die Verwendung zentraler Komponenten dieser Softwaresuite, wie ParaStation MPI und ParaStation Management, konnte so der Testcluster in ein modulares Prototypensystem überführt werden, das die Ausführung paralleler HPC-Jobs über die heterogenen Knoten hinweg ermöglicht. Zur Realisierung dieses Betriebsmodells wurden spezifische Softwarebibliotheken für die unterschiedlichen Knotentypen bereitgestellt. Besonders entscheidend war dabei die maßgeschneiderte Konfiguration des Slurm-basierten

Ressourcenmanagements, um eine effiziente Verwaltung und Steuerung heterogener MPI-Jobs über die ParaStation-Integration sicherzustellen.

Diese Arbeiten wurden zudem durch Schulungs- und Supportaufgaben insbesondere im Hinblick auf den Umgang mit der ParaStation Modulo Software Suite begleitet. So wurde von ParTec beispielsweise im Februar 2024 ein umfassendes ParaStation Modulo Tutorial für die Projektpartner gegeben, in dem detailliert auf die Besonderheiten modularer und heterogener MPI-Umgebungen eingegangen wurde.

Darüber hinaus wurden eine ausführliche, projektspezifische Dokumentation der installierten Softwarekomponenten sowie entsprechende Benutzeranleitungen zusammen mit den Spezifikationen der Clusterknoten in einem eigens dafür erstellten Wiki allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Am Ende umfasste diese spezifische Dokumentation folgende Softwarekomponenten von ParTec:

- Nutzer- und Administratoranleitung zu ParaStation Management als lokaler Prozessmanager auf allen Knoten des heterogenen Clusters
- Nutzeranleitung zu ParaStation MPI (zusammen mit der pscom als unterliegende Hochleistungskommunikationsbibliothek)
- sowie Nutzeranleitung und Konfigurationsinformationen zur ParaStation/Slurm-Integration als Ressourcenmanagementsystem des Testclusters.

Diese Softwarekomponenten formten und verwalteten dabei am Ende ein Verbundsystem bestehend aus folgenden sehr unterschiedlichen Knotenplattformen:

- Sapphire Rapids MAX
- NEC SX-Aurora Tsubasa
- AMD EPYC Genoa 9654
- Nvidia Grace-Hopper
- FUJITSU A64FX
- Nvidia Grace-Grace.

Zusätzlich zu den oben erwähnten Softwarekomponenten von ParaStation Modulo kam insbesondere mit *psconfig* auch die ParaStation-native Knotenkonfigurationsdatenbank zum Einsatz, deren Einträge entsprechend für alle diese Knotenplattformen zugeschnitten konfiguriert wurden.

Neben diesen technischen Arbeiten beteiligte sich ParTec zudem regelmäßig an den monatlich stattfindenden Online-Besprechungen sowie an den mindestens einmal jährlich stattfindenden Präsenztreffen des Projekts. Letztere sind in folgender Liste aufgeführt:

- 25. Mai 2023, Gesamtprojekttreffen, Hamburg (in Anschluss an die ISC 2023)
- 05. März 2024, Projekthalbezeittreffen, Dresden (zusammen mit Projektreview)
- 14. Mai 2024, Treffen mit DKRZ im Rahmen der ISC 2024, Hamburg
- 04. August 2025, Gesamtprojekttreffen, Jülich (Abschlusstreffen für ParTec).

Das Projekt-Kick-off-Treffen fand, unter Beteiligung verschiedener Abteilungen von ParTec, am 15. November 2022 als reine Online-Veranstaltung statt.

Abschließend sei erwähnt, dass ParTec sich auch als Autor an der Erstellung eines gemeinsamen Projekt-Papers aktiv und mit eigenen Textbeiträgen beteiligt hat. Dieses Paper mit dem Titel „*Improving Energy Efficiency and Performance of Weather and Climate*

*Simulations by Leveraging the Heterogeneity of Modern Systems*“ wurde zur Vorstellung auf der *17th ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering (ICPE 2026)* eingereicht und als Konferenzbeitrag angenommen, was den erfolgreichen Abschluss des Projektes untermauert.

## Zusammenfassung der Ergebnisse von ParTec

Die zentralen Projektergebnisse für das Teilprojekt von ParTec in EECLiPs lassen sich wie folgt zusammenfassen:

**Hardwareauswahl und Systemzusammenstellung.** ParTec hat durch die frühzeitige und strukturierte Auswahl geeigneter Hardwareplattformen maßgeblich zur Architekturdefinition des heterogenen Testclusters beigetragen. In enger Kooperation mit dem DKRZ konnte den Projektpartnern darauf aufbauend eine bedarfsgerechte Infrastruktur bereitgestellt werden, die es ermöglichte, das Klimamodell ICON effizient auf die heterogenen Clusterknoten abzubilden.

**Aufbau und Betrieb des heterogenen Testclusters.** Durch die Installation und Konfiguration der ParaStation Modulo Software Suite wurde der Testcluster in ein modulares Prototypensystem überführt, das parallele HPC-Jobs über heterogene Knoten hinweg ausführen kann. Die kontinuierliche Wartung und Optimierung dieser zentralen Softwarekomponenten ermöglichte es den Projektpartnern, Analysen der Energieeffizienz in einer überwachten und reproduzierbaren Testumgebung durchzuführen.

**Kompetenzaufbau und Weiterentwicklung.** Durch gezielte Wissensvermittlung, insbesondere durch das ParaStation Modulo Tutorial im Februar 2024, sowie kontinuierlichen Anwenderdialog wurde die nachhaltige Nutzbarkeit des entwickelten Testsystems sichergestellt. Im Rahmen dieser Maßnahmen konnten zudem konkrete Anforderungen aus dem Projektkontext aufgenommen und in Form bedarfsorientierter Anpassungen, zum Beispiel hinsichtlich der Softwarekonfigurationen, gezielt umgesetzt werden.

Durch diese Projektergebnisse hat ParTec somit maßgeblich zur Schaffung der technischen Grundlage in Form des heterogenen, modular nutzbaren und energieeffizienten Testclusters beigetragen, auf dessen Basis die Kernziele von EECLiPs überhaupt erst weiterverfolgt werden konnten.

## Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Alle geleisteten Projektarbeiten von ParTec waren notwendig, um die Projektziele von EECLiPs technisch und organisatorisch zu realisieren, und wurden streng am Arbeitsplan orientiert durchgeführt, um ihre Angemessenheit sicherzustellen. Dabei stand für ParTec insbesondere die Kooperation der Partner im Vordergrund, um im inländischen HPC-Bereich einem Wissens- und Technologietransfer zwischen universitärer Forschung und wirtschaftlicher Anwendung Vorschub zu leisten.

Wie oben bereits bei der Zusammenfassung der Projektergebnisse betont, besteht die Leistung von ParTec in EECLiPs insbesondere in den Beiträgen zur Schaffung der Grundlagen für den Aufbau des heterogenen Testclusters sowie der kontinuierlichen Sicherstellung der Nutzbarkeit des Systems zur verlässlichen Durchführung von Leistungsmessungen und Energieeffizienzanalysen. Ohne diese grundlegenden Beiträge wäre eine zielgerichtete Evaluierung des ICON-Klimamodells in einer ausgewählten, funktionalen und reproduzierbaren Testumgebung nicht möglich gewesen.

Insgesamt waren die Beiträge von ParTec somit sowohl notwendig zur Erreichung der technischen Teilprojektziele als auch angemessen im Umfang und in ihrer Ausrichtung auf die übergeordneten Projektziele von EECLiPs.

## Voraussichtliche Nutzen

Die in EECLiPs gewonnenen Einblicke in die Energieeffizienz von heterogener Hardware bilden einen neuen wichtigen Baustein im Wissensportfolio der ParTec AG. Diese wird hierbei insbesondere die Erfahrungen aus der Hardwareauswahl und dem Aufbau des heterogenen Testclusters in zukünftige HPC-Lösungen, welche auf die Energieeffizienzanforderungen von Kunden zugeschnitten werden, einfließen lassen können. Die Relevanz dieser Erfahrungen zeigt sich auch darin, dass die Bestimmung der Energieeffizienz einzelner Hardwarekomponenten auf Basis von ICON bereits in aktuelle Ausschreibungen des DKRZ eingeflossen ist.

ParTec bietet zudem kommerziellen Support für den Einsatz seiner ParaStation Modulo Software Suite an, der nachhaltig von dem in EECLiPs vollzogenen Wissensaustausch und Anwenderdialog, insbesondere auch im Hinblick auf die besonderen Anforderungen von Heterogenität und Energieeffizienz, profitieren wird. Gleiches gilt für themenverwandte Folgeprojekte, wobei hier insbesondere das EU- und BMFTR-finanzierte SEANERGYS-Projekt genannt werden soll, das energiebewusstes Exascale-Computing vorantreibt und in dem ParTec erneut eine zentrale Rolle übernimmt.

## Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Umfeld von EECLiPs sind in den vergangenen Monaten mehrere relevante Entwicklungen zu verzeichnen, die die Zielsetzung des Projekts unterstützen und ergänzen. Hierbei sind an vorderster Stelle die anderen ebenfalls durch das GreenHPC-Programm des BMBF (heute BMFTR) geförderten Projekte zu nennen, die zeigen, dass im Rahmen des Förderprogramms breit am Thema der Energieeffizienz und speziell auch im Bereich von Co-Design und heterogenen Architekturen gearbeitet wurde, was die Relevanz und Anschlussfähigkeit von EECLiPs weiter stärkt. Dazu zählen neue Ansätze für energieoptimierte numerische Verfahren (siehe u.a. ENSIMA<sup>1</sup>- und SeqAn@FPGA<sup>2</sup>-Projekt), heterogene und netzwerkbasierte Beschleunigerarchitekturen für datenparallele Workflows (siehe u.a. NAAICE<sup>3</sup>- und STXDemo<sup>4</sup>-Projekt) sowie systemübergreifende Monitoring-Frameworks für Energieeffizienz (siehe u.a. EE-HPC<sup>5</sup>- und IT-Zauber<sup>6</sup>-Projekt).

---

<sup>1</sup> <https://www.elektronikforschung.de/projekte/ensima>

<sup>2</sup> <https://www.elektronikforschung.de/projekte/seqan-fpga>

<sup>3</sup> <https://www.elektronikforschung.de/projekte/naaice>

<sup>4</sup> <https://www.elektronikforschung.de/projekte/stxdemo>

<sup>5</sup> <https://www.elektronikforschung.de/projekte/ee-hpc>

<sup>6</sup> <https://www.elektronikforschung.de/projekte/it-zauber>