Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis, Teil I (Kurzbericht)

| Zuwendungsempfänger | Förderkennzeichen |
| --- | --- |
| Deutsches Klimarechenzentrum GmbH | 16ME0586 |

**Vorhabenbezeichnung**

Quelloffene Lösungsansätze für Monitoring und Systemeinstellungen für energieoptimierte Rechenzentren – EE-HPC

**Laufzeit des Vorhabens**

01.09.2022 – 30.11.2025

# 1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundvorhabens EE-HPC war die Entwicklung, Erprobung und Bewertung quelloffener Ansätze zur energieeffizienteren Nutzung und zum energieoptimierten Betrieb von Hochleistungsrechnersystemen. Im Mittelpunkt standen Monitoring, Analyse und Steuerung von Energie- und Leistungsparametern in HPC-Systemen sowie deren Anwendbarkeit in realen Produktionsumgebungen. Das DKRZ brachte in das Vorhaben die Perspektive eines großen wissenschaftlichen HPC-Rechenzentrums mit repräsentativen Anwendungen aus der Klima- und Erdsystemmodellierung ein. Die Aufgaben des DKRZ bestanden insbesondere darin, realistische ICON-basierte Testfälle bereitzustellen, Projektentwicklungen in einer produktionsnahen Umgebung zu testen, den Einsatz von ClusterCockpit auf einem großen Produktivsystem zu begleiten und grundlegende Arbeiten zur Bewertung und Verbesserung der Energieeffizienz des eigenen HPC-Betriebs durchzuführen.

Ein wesentlicher Anspruch der Arbeiten war es, Energieeffizienzmaßnahmen nicht ausschließlich anhand synthetischer Benchmarks oder isolierter Labortests zu bewerten, sondern anhand realitätsnaher Anwendungen, belastbarer Messdaten und produktionsnaher Betriebsbedingungen. Damit sollte sichergestellt werden, dass die im Projekt entwickelten Methoden nicht nur technisch funktionsfähig sind, sondern auch für den dauerhaften Einsatz in großen HPC-Umgebungen geeignet sind.

# 2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Zu Projektbeginn bestand in der HPC-Community ein wachsender Bedarf, die Energieeffizienz großer Rechensysteme nicht nur über Hardwarebeschaffung und Rechenzentrumsinfrastruktur, sondern auch über ein besseres Verständnis des laufenden Betriebs, der Anwendungen und der nutzbaren Steuerungsmechanismen zu verbessern. Für eine belastbare Bewertung energieeffizienter Betriebsstrategien waren realistische Anwendungen, reproduzierbare Messungen und eine enge Kopplung von Systemmonitoring und Anwendungsprofilen erforderlich.

Am DKRZ stand mit ICON eine zentrale betrieblich relevante Anwendung aus der Klima- und Erdsystemmodellierung zur Verfügung. ICON eignete sich besonders als praxisnaher Testfall, weil daran Energieeffizienzmaßnahmen nicht nur abstrakt, sondern anhand einer wissenschaftlich relevanten Anwendung mit unmittelbarem Bezug zum Produktivbetrieb untersucht werden konnten.

Gleichzeitig bestanden am DKRZ bereits bisher ungenutzte Mess- und Überwachungsmöglichkeiten auf verschiedenen Ebenen. Diese Datenquellen waren jedoch im Hinblick auf energieeffiziente HPC-Betriebsstrategien systematisch zusammenzuführen, zu bewerten und zu validieren. Insbesondere mussten die Aussagekraft einzelner Messpunkte, die Qualität der verfügbaren Sensordaten und die Zuordnung unterschiedlicher Verbraucher im Rechenzentrumsbetrieb untersucht werden.

Neben den Messdaten waren auch Steuerungsmöglichkeiten auf Systemebene relevant. Dazu gehörten statische Konfigurationen, sowie Ansätze zur dynamischen Leistungssteuerung, etwa durch Variation von Leistungsgrenzen. Zu Projektbeginn war offen, in welchem Umfang solche Ansätze im produktiven HPC-Betrieb belastbar nutzbar sind und welche Kompromisse zwischen Durchsatz und Energieverbrauch entstehen.

# 3 Aufbau und wesentliche Ergebnisse

Das DKRZ stellte ICON-basierte Testfälle, Eingabedaten und Referenzmessungen bereit und unterstützte die Projektpartner bei deren Nutzung. Dazu gehörten Single-Node-Tests mit

ICON-Atmosphäre an der RWTH Aachen zur Untersuchung von Compiler- und Laufzeit-Optimierungen sowie Single-Node-ICON-Konfigurationen für Arbeiten zur dynamischen Leistungsoptimierung. Die Unterstützung umfasste Hinweise zur Ausführung, die Abstimmung vergleichbarer Messungen sowie die Einordnung von Referenzergebnissen. Dadurch konnten Optimierungs- und Entwicklungsansätze anhand einer produktionsrelevanten wissenschaftlichen Anwendung bewertet werden.

Ein zweiter Schwerpunkt lag auf der produktionsnahen Erprobung der im Projekt entwickelten Werkzeuge und Methoden. Das DKRZ testete Projektentwicklungen unter den Anforderungen eines großen HPC-Produktivsystems und gab Rückmeldungen zu Praxistauglichkeit, Skalierbarkeit, Nutzbarkeit und Betriebsintegration. Zudem wurde ClusterCockpit am DKRZ in Produktion ausgerollt und kontinuierlich getestet, sodass Anforderungen und Verbesserungsvorschläge aus dem Betrieb eines großen HPC-Systems in die Weiterentwicklung einfließen konnten.

Parallel führte das DKRZ grundlegende Analysen zur Energieeffizienz des eigenen HPC-Betriebs durch. Dazu zählten die Analyse von Messstellen der Gebäudeleittechnik, die Validierung von Out-of-Band-Node-Power-Sensorik, Prozessorleistungsstufenbasierte (Fabric P-State) Optimierungen sowie Test verschiedener Prozessor-Leistungsgrenzen (TDP-Sweep). Die P-State-Tests zeigten, dass mit einer optimierten statischen Konfiguration etwa fünf Prozent Energie eingespart werden können; diese Konfiguration wurde Anfang 2024 in den Produktionsbetrieb übernommen.

Mit Tests verschiedener Prozessor-Leistungsgrenzen wurde das Potential dynamischer Leistungssteuerungsansätze abgeschätzt. Durch die Variation von Leistungsgrenzen wurden Zusammenhänge zwischen Laufzeit, Durchsatz und Energieverbrauch untersucht, „retired instructions“ als Durchsatzmetrik validiert und der energieeffizienteste Betriebspunkt von ICON auf Levante bestimmt. Die Messungen verdeutlichen den Zielkonflikt zwischen den Interessen der Nutzerinnen und Nutzer an möglichst kurzen Laufzeiten und dem Interesse des Betreibers an einem energieeffizienten und wirtschaftlichen Systembetrieb. Da zugleich die Nutzbarkeit und Akzeptanz des Systems erhalten bleiben müssen, wurde für den Realbetrieb ein statischer Ansatz über angepasste P-States gewählt. Damit lassen sich bei moderaten Laufzeiteinbußen von etwa 2–3 % rund 5–6 % Energie einsparen.

Insgesamt bilden die Arbeiten des DKRZ eine belastbare Grundlage für die Bewertung und mögliche spätere Umsetzung dynamischer Leistungssteuerung im HPC-Betrieb. Sie zeigen, dass belastbare Messdaten, realistische Anwendungen und produktionsnahe Tests zentrale Voraussetzungen für die Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen im HPC-Umfeld sind.

## 4 Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen und Projektpartnern

Die Arbeiten des DKRZ erfolgten in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Für die RWTH Aachen wurden ICON-basierte Single-Node-Testfälle bereitgestellt und bei der Nutzung für Compiler- und Laufzeit-Optimierungen unterstützt. Für die Entwicklung dynamischer Energieoptimierungsmetoden wurden ebenfalls ICON-Konfigurationen und Referenzmessungen zur Unterstützung von Entwicklungsarbeiten bereitgestellt.

Die produktionsnahen Erfahrungen des DKRZ, insbesondere beim Rollout und Betrieb von ClusterCockpit sowie bei der Bewertung von Messdaten und Energieeffizienzmaßnahmen, wurden in den Austausch mit den Projektpartnern eingebracht. Damit konnte das DKRZ sicherstellen, dass Anforderungen aus einem großen HPC-Produktionsbetrieb im Projekt berücksichtigt wurden.