

# High Performance Computing

Einsatzbereiche in der Luft- und Raumfahrt

Bild: DLR



**H**igh Performance Computing (HPC) bedeutet Hochleistungsrechnen und ist der Turbo unter den Rechenmethoden. HPC dreht sich um das Durchführen komplexer Berechnungen und die Nutzung von riesigen Datenmengen, die parallel auf leistungsstarken Rechnern ausgeführt werden. Es ist ein unverzichtbares Werkzeug für numerische Simulationen, Datenanalysen und viele andere Forschungsbereiche.

### Einsatzgebiete

Bei der Untersuchung komplexer Vorgänge hat sich neben der Durchführung von Experimenten und theoretischen Betrachtungen die **numerische Simulation** etabliert. Mithilfe numerischer Simulationen können komplexe Systeme oder Phänomene mathematisch modelliert und analysiert werden, um das Verhalten des zu untersuchenden Systems unter verschiedenen Bedingungen vorhersagen zu können.

HPC spielt in der numerischen Simulation eine entscheidende Rolle, da komplexe Simulationen oft enorme Rechenressourcen erfordern. **Hochleistungsrechner** ermöglichen es, große Datenmengen schnell zu verarbeiten und komplexe Berechnungen effizient durchzuführen. Dazu gehören numerische Strömungssimulationen, Festigkeitsberechnungen, Werkstoffdesign, die Formoptimierung von Luft- und Raumfahrtsystemen, Atmosphärenforschung, medizinische Simulationen und Analysen oder Sicherheitsforschung zum Schutz der Bevölkerung und von Infrastrukturen. Diese Anwendungen stellen besonders hohe Anforderungen an Rechengeschwindigkeit und verteilt paralleles Datenmanagement, zum Beispiel effiziente Datenpartitionierung und -kommunikation mit komprimierten Datenstrukturen, und verursachen hohe Kosten.

Umfangreiche Daten entstehen nicht nur bei der Simulation komplexer Modellsysteme, sondern auch bei der Nutzung und Zustandsüberwachung von Luft- und Raumfahrtsystemen oder bei medizinischen Messkampagnen. Zur performanten Analyse großer Datenmengen auf HPC-Clustern sind effiziente parallele **Algorithmen** aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) geeignet. Herausfordernd ist hier die Entwicklung robuster und sicherer Algorithmen, die die Genauigkeit von physikalischen

Modellen und numerischen Simulationen mit der Flexibilität und Geschwindigkeit datengetriebener KI-Modelle kombinieren.

Zur effizienten Nutzung von HPC-Systemen ist der Einsatz methodisch fundierter, performanter und skalierbarer Softwaretechnologien für die Gestaltung zuverlässiger und innovativer Lösungen in diesen Einsatzgebieten unerlässlich.

### Anwendung in Luft- und Raumfahrt

Im Folgenden werden zwei ausgewählte HPC-Anwendungsgebiete im Bereich Luft- und Raumfahrt, die HPC-Simulations- und HPC-Datenanalysetechniken einsetzen, kurz skizziert.

#### Geometriemodellierung und adaptive Gitter für das Flugzeugdesign

An der Optimierung eines Flugzeugs, zum Beispiel zur Minimierung des Treibstoffverbrauchs, sind viele Disziplinen beteiligt, die jeweils über eigene Simulationswerkzeuge verfügen. Viele dieser Simulationswerkzeuge erfordern eine genaue Modellierung der Flugzeuggeometrie. Im *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)* wird diese Aufgabe von der Software **TiGL (TiGL Geometry Library)** übernommen, die aus einer parametrischen Geometriebeschreibung eine vollständige dreidimensionale geometrische Darstellung des Flugzeugs erzeugt. Dies umfasst sowohl die äußere Geometrie, die der Luftströmung ausgesetzt ist, als auch die innere Strukturgeometrie, die für die Laststabilität des Flugzeugs entscheidend ist. TiGL basiert auf dem *CPACS-Format*, einer gemeinsamen Sprache für das Flugzeugdesign. **Abbildung 1** zeigt eine mit TiGL erzeugte, parametrisch beschriebene **Flugzeuggeometrie**.

Aus Flugzeuggeometrien hoher Qualität lassen sich **numerische Gitter** erzeugen, die beispielsweise HPC-Strömungssimulationen an Flugzeugen möglich machen, **siehe Abbildung 2**. Das Rechengebiet wird zunächst in ein Gitter aus unterschiedlichen geometrischen Formen wie Dreiecken, Vierecken, Hexaedern oder Tetraedern aufgeteilt. Je feiner die Auflösung dieses Gitters ist, desto genauer sind die Ergebnisse der Simulation.

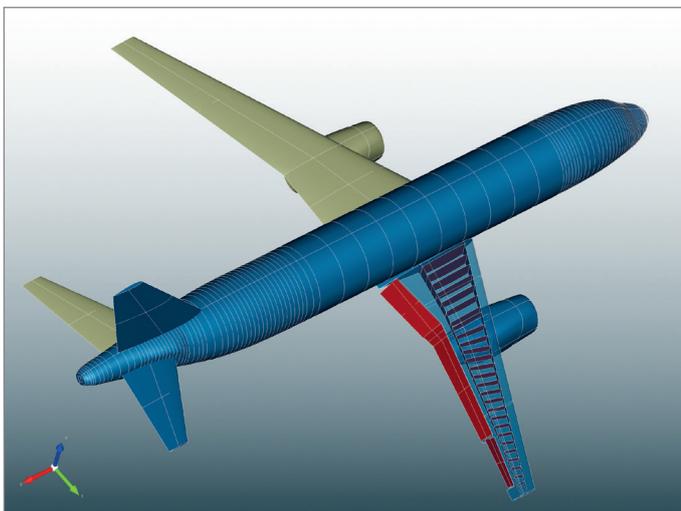


Abbildung 1: Mit TiGL modellierte Flugzeuggeometrie

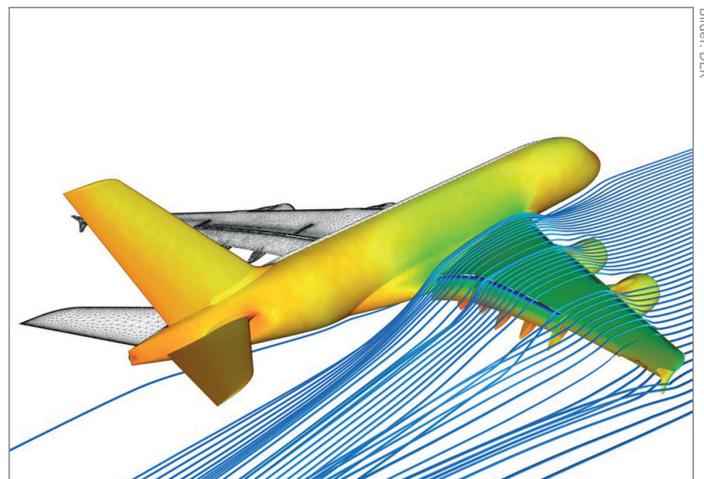


Abbildung 2: Ergebnis einer numerischen Strömungssimulation an einem Airbus A380 auf einem HPC-Cluster (Quelle DLR)

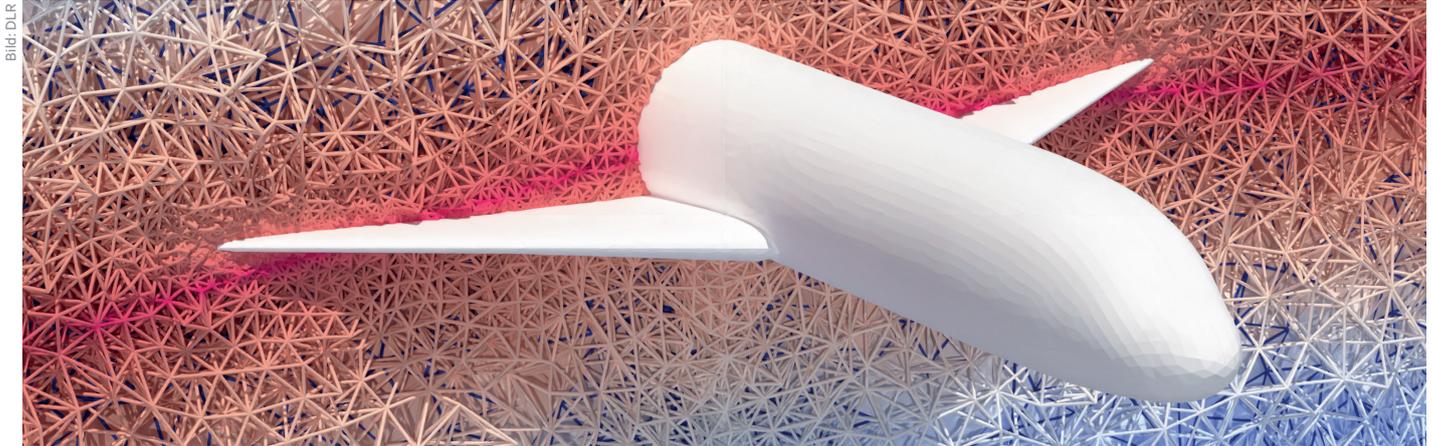


Abbildung 3: Skalierbare adaptive Gitter zur Strömungssimulation an einer Flugzeuggeometrie

Eine feinere Auflösung erhöht Rechenzeit und Speicherbedarf der Simulation drastisch. Adaptiv werden die Gitter, wenn sie gezielt nur an den Stellen verfeinert werden, an denen eine feine Auflösung benötigt wird, und an anderen Stellen gröber bleiben. Eine Verfeinerung des Gitters ist für eine Strömungssimulation an der Flugzeuggeometrie in **Abbildung 3** direkt am Flugzeugquerschnitt sinnvoll. Ändert sich die Gitterauflösung während der Simulation, beispielsweise durch auftretende Lastspitzen am Flugzeug oder durch Wirbelbildung in der Strömung, spricht man von **dynamischen adaptiven Gittern**. Die Unterteilung in feine und grobe Rechengebiete erlaubt, sehr effizient mit der zur Verfügung stehenden Rechenkapazität umzugehen.

Zum effizienten Management von dynamischen adaptiven Gittern und von Daten auf diesen Gittern wird im DLR die extrem skalierbare **Softwarebibliothek t8code** eingesetzt. t8code unterstützt und verbessert unterschiedliche Simulationsanwendungen als Plugin und kann für jede Simulationssoftware, die Gitter verwendet, eingesetzt werden. In praktischen Anwendungen auf Höchstleistungsrechnern mit bis zu einer Million parallelen Prozessen und Gittern mit mehr als einer Billion ( $10^{12}$ ) Elementen hat t8code seine Leistungsfähigkeit nachgewiesen. t8code erreicht diese extreme Effizienz durch einen baumbasierten Ansatz und den methodischen Einsatz von raumfüllenden Kurven. Die zugehörigen Datenstrukturen sind äußerst speichereffizient, für unterschiedlichste Geometrien einsetzbar und erlauben hohe Rechenleistung.

HPC-Technologie ermöglicht die schnelle Geometriemodellierung, Gittererzeugung und Simulation von Flugzeugeigenschaften und Flugverhalten auf dynamischen adaptiven Gittern. Dies unterstützt das Konzept des **digitalen Zwillings** eines Flugzeugs, das einerseits teure, energieintensive Experimente mit realen Prototypen verringert und andererseits die Bewertung von Eigenschaften realer Flugzeuge im Betrieb erlaubt.

### HPC für besseren Küstenschutz

Stürme, Sturmfluten und Starkregen setzen den Küstenregionen der deutschen Nord- und Ostsee zunehmend zu. Der Klimawandel verschärft die Situation und stellt Inseln, Häfen und Küstengemeinden vor neue Herausforderungen. Das DLR-Projekt **RESIKOAST** hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Widerstandsfähigkeit der Küstenregionen zu verbessern. Eine Schlüsselrolle spielt dabei die Früherkennung von **Veränderungen** in Küstengebieten durch den Einsatz modernster Technologien. Doch wie können diese Veränderungen effektiv und rechtzeitig erkannt werden?

Satelliten umkreisen die Erde und nehmen Bilder der Erdoberfläche auf. Eine zentrale Aufgabe ist die Analyse dieser Bilder über mehrere Jahre. Dazu sollen KI-Methoden eingesetzt werden. Die Herausforderung dabei ist die Größenordnung der Daten von Terabytes (circa  $10^{12}$  Bytes) bis Petabytes (circa  $10^{15}$  Bytes). Daher sind leistungsstarke Computertechnologien des HPC erforderlich, um diese Daten im Hinblick auf Veränderungen in der Küstenzone zu analysieren.

Im Projekt RESIKOAST kommt das **Helmholtz Analytics Toolkit (HeAT)** zum Einsatz, eine speziell für die massiv-parallele Datenverarbeitung auf HPC-Großrechnern entwickelte KI-Software. HeAT ermöglicht es, große Datensätze effizient auf mehrere Recheneinheiten zu verteilen und gleichzeitig zu verarbeiten (siehe **Abbildung 4**). Gerade bei der Analyse von Erdbeobachtungsdaten bietet dies enorme Vorteile, denn so können Daten von Küstenregionen großflächig untersucht werden, ohne an die Grenzen einzelner Rechner zu stoßen.

Ein Beispiel verdeutlicht die Vorteile dieser Methode: **Abbildung 5**, oben, zeigt ein Radarbild der deutschen Nordseeküste. Durch den Einsatz von HeAT können die kompletten Bilder über

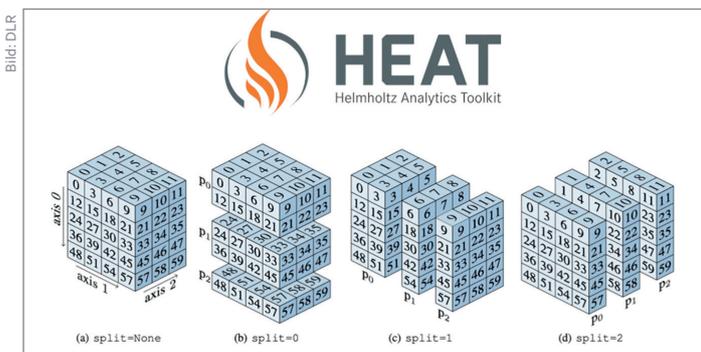


Abbildung 4: Das Grundprinzip von HeAT besteht darin, große multidimensionale Daten entlang einer Achse aufzuteilen (englisch: split). Die Berechnungen auf den Teildatensätzen werden dann auf verteilten Recheneinheiten eines HPC-Systems durchgeführt und die Ergebnisse von HeAT intern wieder zusammengeführt

einen Zeitraum von fünf Jahren an einem Tag analysiert werden. Möglich wird dies durch den Einsatz von Höchstleistungsrechnern wie *terrabyte*<sup>6</sup>, der gemeinsam vom DLR und dem Leibniz-Rechenzentrum der *Bayerischen Akademie der Wissenschaften* betrieben wird. Auf einem einzelnen Rechner hätte diese Verarbeitung Monate gedauert.

Bemerkenswert ist die präzise Erfassung von Veränderungen in den Küstenregionen, die mit **extremen Wetterereignissen** einhergehen. Ein markantes Beispiel ist das Sturmtief Nadia, das am 29. und 30. Januar 2022 mit orkanartigen Böen über die Nord- und Ostseeküste hinwegfegte. Die Detailaufnahme in **Abbildung 5**, unten, zeigt in Rot die deutlichen Spuren, die Nadia zum Beispiel in der Region um Cuxhaven hinterlassen hat.

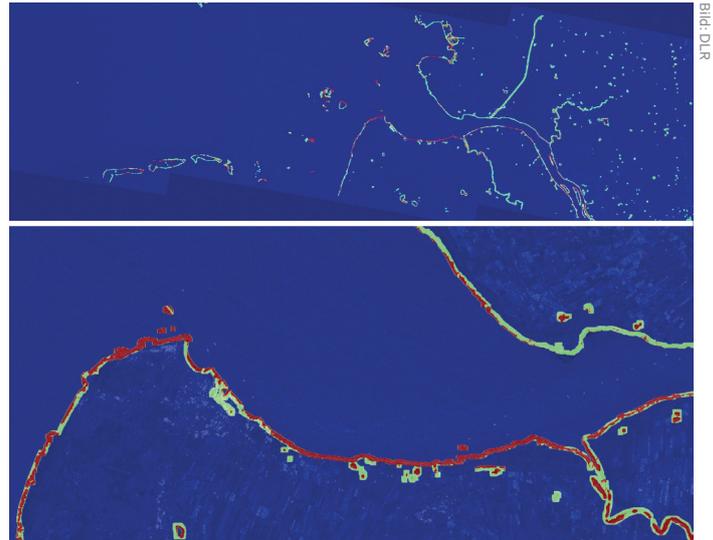
Langfristig soll die im Projekt entwickelte Methodik dazu beitragen, den **Küstenschutz** zu verbessern. Durch die Früherkennung von Risiken können rechtzeitig Maßnahmen ergriffen und Küstenregionen widerstandsfähiger gegen die Folgen des Klimawandels gemacht werden. HPC, insbesondere im Bereich der künstlichen Intelligenz, ist daher ein wichtiges Werkzeug für den Schutz unserer Küsten vor extremen Wetterereignissen.

## Aufgaben der Abteilung High Performance Computing des Instituts für Softwaretechnologie im DLR

Die Abteilung HPC des DLR-Instituts für Softwaretechnologie arbeitet mit fortschrittlichen Rechenmethoden, die komplexe Berechnungen und die parallele Verarbeitung großer Datenmengen auf Hochleistungsrechnern ermöglichen. Neben der Softwareentwicklung für klassische Rechencluster und Rechner der Exascale-Klasse, die bis zu  $10^{18}$  Gleitkomma-Operationen pro Sekunde schaffen, forscht die Abteilung an Anwendungen für Quantencomputer.

Ausgewählte Aufgaben der Abteilung HPC im DLR:

- Für **HPC-Simulations- und Big-Data-Analysesoftware** übernimmt das Team das Performance-Engineering, eine Informatikdisziplin, um Softwarelösungen skalierbar, performant und energieeffizient zu machen. Dazu werden alle Parallelitätsebenen auf HPC-Clustern vom Rechenkern über den Rechenknoten bis zum Netzwerk aus Rechenknoten genutzt. Hierdurch kann eine Beschleunigung von Programmen um mehrere Größenordnungen erreicht werden. Selbst auf einem Rechenkern ist durch Nutzung der internen Parallelität eine Beschleunigung um beispielsweise den Faktor 100 möglich.
- Für **Luft- und Raumfahrtanwendungen** wird HPC-Software zur Geometriemodellierung und zur extrem skalierbaren Gitterverfeinerung für gitterbasierte Simulationscodes entwickelt. Für Simulationsframeworks und digitale Zwillinge forscht das Team an Exascale-fähigen Lösungsalgorithmen und Softwarebibliotheken. Neben dem oben genannten Anwendungsbereich Flugzeugsimulation werden diese HPC-Techniken für schnelle und genaue Katastrophenvorhersagen und im Krisenmanagement eingesetzt, beispielsweise bei Flutkatastrophen.
- Für **parallele Rechensysteme** entwickeln Expertinnen und Experten skalierbare und robuste KI-Algorithmen unter Berücksichtigung von Datenunsicherheiten, die sich für sicherheitskritische Anwendungen wie zum Beispiel die schnelle



**Abbildung 5:** Am 29. und 30. Januar 2022 fegte das Sturmtief Nadia über Deutschland hinweg und verursachte zahlreiche Veränderungen an der Küstenlinie (rot eingefärbt). **Oben:** Veränderungen an der gesamten deutschen Nordseeküste am 30. Januar 2022. **Unten:** Detailausschnitt der Küstenregion um Cuxhaven

Regelung von Raketentriebwerken eignen. Robustheit der Algorithmen erreicht das Team, indem es neben der datengetriebenen Modellgenerierung durch maschinelles Lernen auch klassische physikalische und mathematische Modelle berücksichtigt.

- Für **HPC-Cluster** forscht das Team an parallelen prädiktiven Software-Frameworks, die agentenbasierte Modellierung und Simulation in Kombination mit numerischen und statistischen Methoden nutzen, z. B. zum Schutz der Bevölkerung und von Infrastrukturen in Krisenfällen. Während der Coronakrise haben die Expertinnen und Experten das Framework *MEMilio* zur Pandemieanalyse, Pandemieausbreitungsvorhersage und Simulation der Effektivität von Gegenmaßnahmen entwickelt.
- Im Bereich **Quantencomputing** forschen die Expertinnen und Experten seit mehr als zehn Jahren am gesamten Software-Stack von der Hardware bis zur Anwendung. Einsatzfelder sind unter anderem Kryptografie, Energiesysteme, Batterieforschung und Radartechnologie. Der Fokus liegt auf der Entwicklung anwendungsspezifischer Quantenalgorithmen, beispielsweise zur Lösung diskreter Optimierungsprobleme auf Quantencomputern unter anderem für Flugverkehrsmanagement und Satelliten-Scheduling. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Nutzung von Quantencomputern als Beschleuniger für klassische HPC-Systeme, z. B. in der Materialforschung. ●

## DER AUTOR

**Dr.-Ing. Achim Basermann** ist Leiter der Abteilung *High Performance Computing* des DLR-Instituts für Softwaretechnologie am Standort Köln. Nach zwölf Jahren Forschung im Bereich *Supercomputing* bei der japanischen Firma *NEC* schloss er sich 2009 dem DLR an. Dr. Basermanns aktuelle Forschungsinteressen liegen in den Bereichen *Performance-Engineering*, extrem parallele numerische Algorithmen, *High Performance Data Analytics*, Datenpartitionierungsmethoden und Quantencomputing.