



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Hoch- und Höchstleistungsrechnen für das digitale Zeitalter

Forschung und Investitionen zum High-Performance-Computing





Vorwort

Simulationen zum Klimawandel, Anwendungen künstlicher Intelligenz, Viren- und Materialforschung – dafür sind Supercomputer mit hoher Rechenleistung nötig. Supercomputer ermöglichen exzellente Wissenschaft. Sie beschleunigen Innovationen. Und sie sichern Deutschland einen vorderen Platz im internationalen Wettbewerb.

Daher fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung den Ausbau der Rechnerinfrastruktur in Deutschland intensiv. Wir investieren in die Forschung und Entwicklung des Hoch- und Höchstleistungsrechnens. Dabei wollen wir unsere Rechner und Rechenzentren nicht nur leistungsfähig, sondern auch energieeffizient und sparsam gestalten. Unser Ziel ist klar: Wir wollen, dass in Deutschland auch künftig die besten und fortschrittlichsten Rechentechnologien zur Verfügung stehen – für Wissenschaft und Industrie, zum Wohle der Menschen.

Wir arbeiten dazu mit den Bundesländern eng zusammen: Das Gauss Centre for Supercomputing und das Nationale Hochleistungsrechnen an Hochschulen zeigen, wie gut die Kooperation funktionieren kann. Wir schaffen eine europaweit einzigartige Infrastruktur. Und wir haben Europa im Blick: Darum beteiligen wir uns auch an der europäischen Partnerschaft EuroHPC. Staaten,

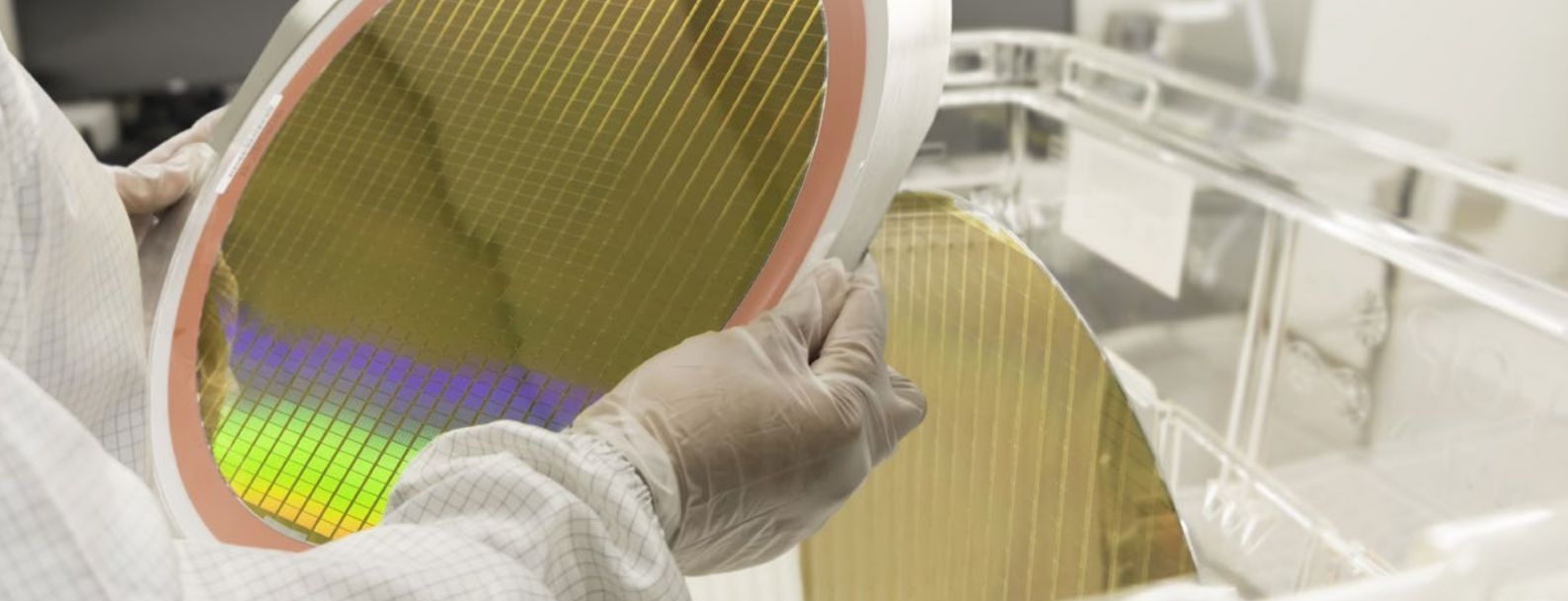
Wirtschaft und Wissenschaft arbeiten dabei Hand in Hand, um die technologische Souveränität Europas zu stärken. Technologische Souveränität heißt für uns, eigene Kompetenzen in Wissenschaft und Wirtschaft auf höchstem Niveau zu entwickeln. Nur so können wir einen wechselseitigen Austausch mit den weltweit führenden Forschungseinrichtungen und Unternehmen gewährleisten. Und zwar auf Augenhöhe.

Unser neues Programm für das Hoch- und Höchstleistungsrechnen stärkt exzellente Forschung in Wissenschaft und Industrie – sowohl für Forschende als auch für Anwendende und Nutzende. Es trägt zum Ziel der Datenstrategie der Bundesregierung bei, Dateninfrastrukturen leistungsfähig und nachhaltig zu gestalten. Mit diesem Programm machen wir Deutschland fit für die Datenverarbeitung der Zukunft.

Anja Karliczek
Mitglied des Deutschen Bundestages
Bundesministerin für Bildung und Forschung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2	
2	Thesen	4	
2.1	High-Performance-Computing ist essenzielles Werkzeug der Forschung	4	
2.2	High-Performance-Computing ist Grundlage innovativer Wertschöpfung	4	
2.3	High-Performance-Computing ist Teil technologischer Souveränität	5	
3	Ausgangslage	6	
4	Herausforderungen	10	
4.1	Analyse großer Datenmengen und Anwendungen Künstlicher Intelligenz	10	
4.2	Steigende Komplexität von Anwendungen und Rechnern	10	
4.3	Verbesserung der Energieeffizienz	11	
4.4	Nutzung neuer Rechentechnologien	11	
4.5	Technologische Souveränität in Europa	12	
5	Ziele	14	
5.1	Deutschland als Spitzenreiter positionieren	14	
5.2	Exzellente und innovative Forschungsergebnisse ermöglichen	15	
5.3	Innovative Wertschöpfung in Deutschland ermöglichen	15	
5.4	Technologische Souveränität und Energieeffizienz stärken	15	
6	Maßnahmen	16	
6.1	Mit den Ländern eng zusammenarbeiten	16	
6.2	Europäisches Ökosystem weiterentwickeln ..	16	
6.3	Möglichkeiten erweitern	16	
6.4	Zugänge vereinfachen	20	
6.5	Kompetenzen stärken	22	
6.6	Neue Technologien erforschen	25	
7	Evaluation	28	
	Glossar	29	
	Impressum	33	



1 Einleitung

Leistungsfähige Computer eröffnen ganz neue Möglichkeiten für Forschung und Innovation. Bestimmte Fragestellungen aus Wissenschaft und Industrie lassen sich mit Simulationen und Modellen am Computer deutlich schneller und effizienter beantworten als mit Experimenten. Und Phänomene, die zu groß oder zu klein, zu schnell oder zu langsam für Experimente sind, können nur durch Simulation erforscht werden. Damit unterstützen Computersimulationen die Forschung für nahezu alle Bereiche des täglichen Lebens:

- Wie wird sich das Klima verändern?
- Wie dringen Viren in den Körper ein?
- Wie lässt sich ein Katalysator optimieren?
- Wo ist der beste Standort für ein Windrad?

Leistungsfähige Computer sind gefragt, wenn es darum geht, riesige Datenmengen auszuwerten und komplexe Prozesse zu analysieren. Dies erfordert eine Rechenleistung, die millionenfach größer ist als die eines PC. Zum Einsatz kommen extrem rechenstarke Supercomputer mit angepasster Software und entsprechendem Know-how: Zusammen ergibt dies „High-Performance-Computing“ (HPC).

High-Performance-Computing ist ein integraler Bestandteil zahlreicher Forschungsfelder. Somit ist HPC ein kritischer Faktor für den Erfolg des Wissenschafts- und Forschungsstandorts Deutschland. Ohne eigene Fähigkeiten im HPC wären Wissenschafts- und Forschungsbereiche vielfach nicht wettbewerbsfähig.

Bei der Leistungsfähigkeit der installierten Supercomputer hat Deutschland im europäischen Vergleich einen Spitzenplatz inne. Unter dem Dach des Gauss Centre for Supercomputing (GCS) werden drei Höchst-

leistungsrechner betrieben, die Deutschland derzeit eine international wettbewerbsfähige Position sichern. Durch die weltweiten Bestrebungen nach immer leistungsfähigeren Systemen ist die Rangliste der schnellsten Rechner aber in ständiger Bewegung.

Deutschland gehört auch bei der Entwicklung von Algorithmen und Anwendungsprogrammen für das HPC zu den führenden Ländern.

Mit dem Programm „Hoch- und Höchstleistungsrechnen für das digitale Zeitalter – Forschung und Investitionen zum High-Performance-Computing“ richtet das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Förderung und Finanzierung des High-Performance-Computing in Deutschland strategisch auf das kommende Jahrzehnt aus. Das Programm schafft einen kohärenten Rahmen für die mit der EU und den Bundesländern verzahnten Maßnahmen des Bundes und stellt dar, wie Deutschland die erwarteten Chancen nutzen und die damit verbundenen Herausforderungen meistern will. Unter anderem werden die Ausbauaktivitäten der Rechner übergreifend betrachtet, die Anwendung in der Wirtschaft vorangetrieben und das Hochleistungsrechnen an Hochschulen gestärkt. Dies wird flankiert durch Forschungsansätze zur Entwicklung effizienter und leistungsfähiger Hard- und Software für künftige Rechnersysteme und Anwendungen.

Die Schwerpunkte des Programms wurden im Austausch mit der Fachszene erarbeitet. In Fachgesprächen mit Wissenschaft und Wirtschaft wurden die Herausforderungen identifiziert und Maßnahmen diskutiert. Die künftige Ausrichtung des Gauss Centre for Supercomputing wurde mit den Ländern Bayern, Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen entwickelt, in denen die

Was ist High-Performance-Computing?

Beim High-Performance-Computing (HPC) wird Rechenleistung in sogenannten Supercomputern aggregiert. Hierfür werden in hochintegrierten Systemen sehr viele Prozessoren so miteinander verbunden, dass sie extrem schnell komplexe Berechnungen durchführen können. Dabei kommen teilweise über 100.000 Prozessoren in einem Supercomputer zum Einsatz.

High-Performance-Computer sind um ein Vielfaches leistungsfähiger und schneller als Desktop-Computer. Sie können große Datenmengen verarbeiten und sehr schnell aufwändige Berechnungen lösen.

Die Leistung von Supercomputern wird in FLOPS gemessen („floating point operations per second“). Dazu löst der Computer eine standardisierte Rechenaufgabe und die Anzahl von Berechnungen pro Sekunde wird gemessen. Die Leistung des schnellsten deutschen Rechners beträgt derzeit rund 70 PetaFLOPS oder 70 Milliarden FLOPS. Dies entspricht in etwa der Leistung von 2 Millionen Laptops, die alle miteinander verbunden sind. Die Leistung eines Supercomputers bei dieser Standardaufgabe (ein sog. Benchmark) sagt aber

nur wenig darüber aus, welche Leistung er für eine bestimmte Anwendung erreicht, beispielsweise die Simulation eines Moleküls. Dies ist vor allem von der Optimierung der Software und dem guten Zusammenspiel mit der Hardware abhängig.

Es wird zwischen Hoch- und Höchstleistungsrechnern unterschieden, wobei Höchstleistungsrechner die technisch erreichbare Spitze markieren und deshalb in Teilen Experimental-Status inne haben, während Hochleistungsrechner eher die leistungsfähigsten kommerziellen Serienprodukte bezeichnen.

Man unterscheidet beim High-Performance-Computing zwischen „Capability Computing“, also einzelnen Rechenaufgaben, die besonders viele Prozessoren und Speicher benötigen und deren Bedarf mit der Problemgröße skaliert, und „Capacity Computing“, also das Berechnen von Problemen, die leicht in viele parallele Aufgaben mittlerer Komplexität aufgeteilt werden können, aber zusammen einen sehr hohen Rechenbedarf haben.

Rechner angesiedelt sind und von denen sie mitfinanziert werden. Die sogenannte Smart-Scaling-Strategie des GCS analysiert und prognostiziert den Bedarf der anwendenden Gruppen und bildet eine wichtige Grundlage des Programms. Mit Blick auf die Synergien, die mit einem europäischen Ökosystem des High-Performance-Computing erschlossen werden sollen, sind Abstimmungen mit den Partnern Deutschlands in der EU und der Europäischen Kommission als wesentliches Element in das Programm eingeflossen. Die Inhalte des Programms werden in den nächsten vier Jahren im Austausch mit der Fachszene und Stakeholdern kontinuierlich überprüft und weiterentwickelt. Im Jahr 2023 soll über eine dreijährige Verlängerung oder eine Neuauflage und Neuausrichtung entschieden werden.

Das Programm trägt zur Umsetzung der Hightech-Strategie 2025 bei, insbesondere indem es den Zugang zu Rechnerkapazitäten und den neuesten Hardware- und Softwaretechnologien gewährleistet. Das Programm ist Teil der Datenstrategie der Bundesregierung und trägt zur Digitalstrategie des BMBF bei. Es hat Berührungspunkte zu zahlreichen weiteren Programmen und Strategien der Bundesregierung, insbesondere zum

Rahmenprogramm Mikroelektronik, zum Regierungsprogramm Quantentechnologien, zur Strategie Künstliche Intelligenz sowie zum Aktionsplan Forschungsdaten und zum Aktionsplan ErUM-Data des BMBF.

Das BMBF will mit dem Programm ein umfassendes Angebot an Rechnern und Kompetenzen schaffen, das dem Bedarf von Wissenschaft und forschender Industrie im digitalen Zeitalter auch in Zukunft gerecht wird. Zusammen mit den europäischen Partnern will Deutschland – unter anderem durch Beschaffung von Exascale-Rechnern – High-Performance-Computing einer bislang unerreichten Leistungsklasse bereitstellen und somit für den Wirtschafts- und Innovationsstandort Deutschland im Bereich des Supercomputings weltweite Wettbewerbsfähigkeit sichern.

Das BMBF fördert Ausbau, Betrieb und Vernetzung von Hoch- und Höchstleistungsrechnern, schafft die Voraussetzungen für nachhaltige und leistungsfähige Datentechnologien, -anwendungen und -infrastrukturen und leistet so einen Beitrag zur digitalen und technologischen Souveränität Deutschlands und der Europäischen Union.



2 Thesen

2.1 High-Performance-Computing ist essenzielles Werkzeug der Forschung

Von der Klimamodellierung, der Simulation von Virusproteinen und der Entwicklung von Arzneimitteln über die Modellierung des Universums bis hin zur Analyse innovativer Konzepte für Solarzellen: Viele Fragestellungen in der Forschung verlangen nach immer komplexeren und genaueren Modellen und Analysen, nach Einsatz von Künstlicher Intelligenz und nach der Analyse großer Datenmengen. Hier kommt High-Performance-Computing ins Spiel – und ist mittlerweile in vielen Wissenschaftsdisziplinen unverzichtbar. Mit der wachsenden Größe und Komplexität von Modellen

und Datenanalysen wachsen auch die Anforderungen an das High-Performance-Computing: Obwohl immer mehr Rechenleistung zur Verfügung steht, stoßen Wissenschaft und Entwicklung in unterschiedlichsten Disziplinen und Branchen immer wieder an technische Grenzen. Die Weiterentwicklung des HPC ist daher eine Grundvoraussetzung dafür, dass der wissenschaftlich-technische Fortschritt im Fluss bleibt.

2.2 High-Performance-Computing ist Grundlage innovativer Wertschöpfung

Der Einsatz von High-Performance-Computing hat in Wirtschaft und Industrie weitreichende Bedeutung.

Was bedeutet Exascale?

Die aktuell leistungsfähigsten Supercomputer lösen Probleme mit über einer Billion Rechenoperationen pro Sekunde (PetaFLOPS). An der Nachfolgeneration, den Exascale-Rechnern mit bis zu tausend Billionen Rechenoperationen pro Sekunde (ExaFLOPS), wird bereits geforscht. Solche Exascale-Systeme ermöglichen unter anderem realitätsgetreuere Simulationen. Zum Beispiel könnten Wettervorhersagen die ganze Erde mit einer Auflösung von nur einem Kilometer abdecken und dadurch bislang wenig berücksichtigte Effekte genau simulieren. Vorhersagen können damit genauer und langfristiger werden.

Um überhaupt in den Exascale-Bereich kommen zu können, müssen jedoch neueste Prozessoren und Rechenbeschleuniger kombiniert und vernetzt werden. Eine weitere Herausforderung ist der hohe Energiebedarf: Um diesen in den Griff zu bekommen, ist ein optimierter Betrieb der Systeme und hocheffiziente Software nötig. Weltweit wird intensiv an der Entwicklung von Exascale-Systemen und der nötigen Software geforscht. Ein Ziel der europäischen Partnerschaft EuroHPC ist es, in den kommenden Jahren Europas erstes Exascale-System zu realisieren.

Viele Spitzenprodukte lassen sich ohne Simulationen und umfangreiche Analysen weder entwerfen noch verbessern. Dies gilt gerade für jene Bereiche, in denen Deutschland seine Stärken hat: Ob Belastungssimulationen im Maschinenbau, Optimierung von chemischen Prozessen, Genanalysen in der Medizin, digitale Zwillinge in der Industrie oder maschinelles Lernen im Bereich Künstlicher Intelligenz – hochkomplexe Prozesse erfordern extreme Rechenleistung. High-Performance-Computing stellt diese Rechen- und Analyseleistungen, die grundlegende Software und die nötige Expertise zur Verfügung und ermöglicht so Innovationen.

2.3 High-Performance-Computing ist Teil technologischer Souveränität

Die Anforderungen des Supercomputing treiben den Fortschritt bei den zugrundeliegenden Hardware- und Softwaretechnologien. Deren Weiterentwicklung steigert auch in Anwendungsbereichen außerhalb des High-Performance-Computing die Leistungsfähigkeit, zum Beispiel in der Entwicklung von Rechnernetzen, bei Anwendungen der Künstlichen Intelligenz oder hinsichtlich der Energieeffizienz von Rechnerkomponenten und ganzen Rechenzentren. Dies wird die Technologieentwicklung über das HPC hinaus beeinflussen und neue Möglichkeiten der nachhaltigen Digitalisierung von Wissenschaft und Wirtschaft schaf-

fen. Eine auf die technologischen Herausforderungen im High-Performance-Computing ausgerichtete Aus- und Weiterbildung sorgt für den notwendigen Nachschub an exzellenten Fachkräften für Forschung und Entwicklung. Mit HPC entsteht Know-how in Deutschland, das es uns erlaubt, die Digitalisierung wesentlich nach unseren Anforderungen mitzugestalten und unsere technologische Souveränität zu stärken.



3 Ausgangslage

Anspruchsvolle Fragestellungen aus allen Bereichen der Forschung

High-Performance-Computing gehört heute in vielen wissenschaftlichen Disziplinen zu den grundlegenden Forschungsmethoden.

In der Astro- und Teilchenphysik liefern immer umfangreichere Simulationen mit immer höherem Rechenbedarf neue Erkenntnisse über das Universum und seine kleinsten Bausteine. Eine wichtige Rolle spielt HPC auch bei der Klimamodellierung, der Wettersvorhersage, der Ozeanografie und der Erdsystemforschung. Über die rechenintensive Analyse komplexer Klima- und Umweltdaten lassen sich frühzeitig relevante Umweltveränderungen erkennen und Szenarien für den Umgang mit diesen entwickeln.

Der Einsatz von HPC ermöglicht detaillierte Untersuchungen von Prozessen in Biologie und Medizin. Dies trägt zur Entwicklung von Arzneimitteln und Impfstoffen ebenso bei wie zur Auswertung bildgebender Verfahren oder der Genomsequenzierung. In der Chemie können mithilfe von HPC Reaktionen detailliert untersucht und neuartige Materialien designt werden.

Ingenieurwissenschaften und Industrie haben ebenfalls wachsenden Bedarf an Rechenleistung. In Deutschland betrifft dies vor allem den Maschinenbau, die Automobilindustrie sowie die Luft- und Raumfahrt – von der digitalen Produkt- und Prozessprüfung im Rechner bis hin zum „Digitalen Zwilling“.

Leistungsfähige Strukturen des High-Performance-Computings in Deutschland

In Deutschland und auch international ist das Angebot

im High-Performance-Computing für die Wissenschaft in mehrere Ebenen strukturiert – entsprechend der Leistungsfähigkeit der Rechner und der Komplexität der Anwendungen (siehe Abbildung 1).

Auf der Ebene 1 der Leistungspyramide verfügt Deutschland mit dem Gauss Centre for Supercomputing (GCS) über eine international kompetitive, koordinierte Infrastruktur der höchsten Leistungsklasse. Im GCS sind die drei Höchstleistungsrechenzentren am Forschungszentrum Jülich, an der Universität Stuttgart und am Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Garching zusammengefasst. Diese drei Rechner haben jeweils eine unterschiedliche Architektur und Ausrichtung. Zusammen und arbeitsteilig kann das GCS so den Bedarf einer Vielzahl unterschiedlicher Nutzungsanforderungen erfüllen. Die Gesamtleistung der drei HPC-Spitzen-systeme beträgt über 130 PetaFLOPS (Stand November 2020). Dies entspricht in etwa der Leistung von 3,9 Millionen Laptops, die mit hoher Bandbreite vernetzt sind. Die Infrastruktur an den drei GCS-Zentren wird in einer abgestimmten Smart-Scaling-Strategie alternierend ausgebaut. Dieser Ausbau wird durch das BMBF paritätisch mit den Sitzländern auf Basis eines Verwaltungsabkommens finanziert. Außerdem werden alle drei Zentren eng vernetzt und bieten einen einheitlichen Zugang zu Rechenleistung.

Die Ebene 2 umfasst aktuell zwölf etablierte, überregionale HPC-Zentren mit Hochleistungsrechnern an Forschungseinrichtungen und Hochschulen. Mit dem Bund-Länder-Programm zum Nationalen Hochleistungsrechnen (NHR) wird an Hochschulrechenzentren der Ebene 2 während der Programmlaufzeit erstmals

eine bundesweite koordinierte Struktur an Hochschulen aufgebaut, die für die Nutzung durch Hochschulangehörige vorgesehen ist.

Die Ebene 3 besteht vor allem aus regionalen Rechnern, die eine Vielzahl von Anwendungen mit geringeren Leistungsanforderungen für den Bedarf vor Ort bedienen. Diese stehen an den meisten Hochschulstandorten und Forschungseinrichtungen zur Verfügung und werden dort betrieben.

In der Gauß-Allianz (GA), einem gemeinnützigen Verein zur Förderung von Wissenschaft und Forschung im Bereich Hochleistungsrechnen, sind seit 2008 die drei Rechenzentren der Ebene 1, 16 Zentren der Ebenen 2 und 3 sowie das Deutsche Forschungsnetz zusammengeschlossen. Die Mitglieder betreiben zusammen rund 40 HPC-Systeme in ganz Deutschland mit einer aktuellen Leistung von zusammen rund 190 PetaFLOPS (Stand November 2020). Die GA widmet sich auch dem Ausbau und der Bündelung von Beratungs-, Schulungs- und Unterstützungsangeboten.

Höchstleistungen in der Wissenschaft erfordern nicht nur den Zugang zu immer leistungsfähigeren Supercomputern. Weiterer unverzichtbarer Baustein für den Erfolg ist der Zugang zu Wissensbeständen, Datenarchiven und Forschungsergebnissen. Datenbestände von Wissenschaft und Forschung werden durch den Aufbau der Nationalen Forschungsdateninfrastruktur (NFDI) und der European Open Science Cloud (EOSC) systematisch erschlossen und zugänglich gemacht.

Ein europäisches Ökosystem

Im Jahr 2018 wurde das „Gemeinsame Unternehmen EuroHPC“ gegründet, eine institutionalisierte Partnerschaft von Europäischer Kommission, 32 teilnehmenden Staaten und zwei Industrieverbänden. Ziel von EuroHPC ist die Schaffung eines ganzheitlichen Ökosystems im High-Performance-Computing in Europa. Deutschland ist Gründungsmitglied und hat zurzeit den Vorsitz im Verwaltungsrat inne. Eine Säule von EuroHPC ist die Beschaffung von Höchstleistungsrechnern in Europa. Im Jahr 2020 wurden die Standorte der ersten EuroHPC-Rechner ausgewählt. Deutschland beabsichtigt sich an diesem Verfahren bei der Beschaffung von Rechnern der bislang unerreichten Exascale-Klasse zu beteiligen. Die zweite Säule von EuroHPC ist die Förderung von europaweiten Forschungsprojekten zu Grundlagen und Anwendungen für HPC; deutsche Einrichtungen sind in diesen Projekten stark vertreten. Die dritte Säule, der europaweite Ausbau von Kompetenzen, wird durch einen europäischen Verbund nationaler HPC-Kompetenzzentren gefördert. Deutschland übernimmt dabei durch das GCS eine koordinierende Rolle.

Kompetitive Vergabe von Rechenzeit

Der Bedarf an Rechenzeit ist größer als das Angebot. Rechenzeit wird in Deutschland und Europa daher in wissenschaftsgeleiteten und exzellenzorientierten Verfahren vergeben. Deutschlandweit geschieht dies für Anwendungen mit Bedarfen an höchster Rechenleistung am GCS über das rechnergestützte System JARDS, ansonsten regional an den jeweiligen Rechenzentren.

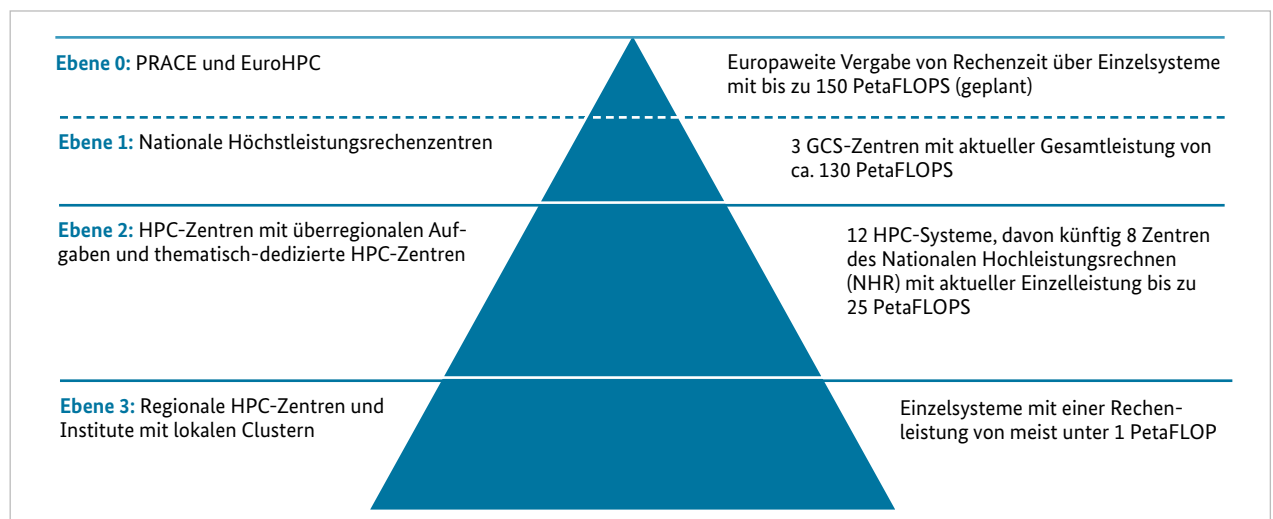


Abbildung 1: HPC-Leistungspyramide (Stand November 2020)

An den drei Zentren des GCS laufen so durchschnittlich mehrere hundert Projekte aus allen wissenschaftlichen Disziplinen.

In Europa wird Rechenzeit für Spitzenbedarfe der Wissenschaft durch die Organisation PRACE (Partnership for Advanced Computing in Europe) vergeben. An PRACE beteiligt sind aktuell 26 Länder; aus Deutschland stellt GCS als eines von fünf so genannten „hosting members“ Rechenzeit für Europa zur Verfügung.

Diese wettbewerblichen Verfahren sichern die Qualität der gerechneten Projekte und eine adäquate Auslastung der Rechner auf jeder Leistungsstufe.

Förderung der Entwicklung von Hardware- und Softwaretechnologien

Hochschulen und Forschungseinrichtungen in Deutschland haben eine hohe Kompetenz in HPC-Technologien und -Anwendungen. Forschung und Entwicklung zu Algorithmen und Software-Technologien sind Schwerpunkte der BMBF-Förderung.

Bei der Rechnerinfrastruktur wie den Kühlsystemen haben u.a. die GCS-Zentren innovative Ansätze entwickelt. So sind sie Vorreiter in der energiesparenden Wasser- oder Adsorptionskühlung, die perspektivisch die heute noch in kommerziellen Rechenzentren übliche Luftkühlung ersetzen wird.

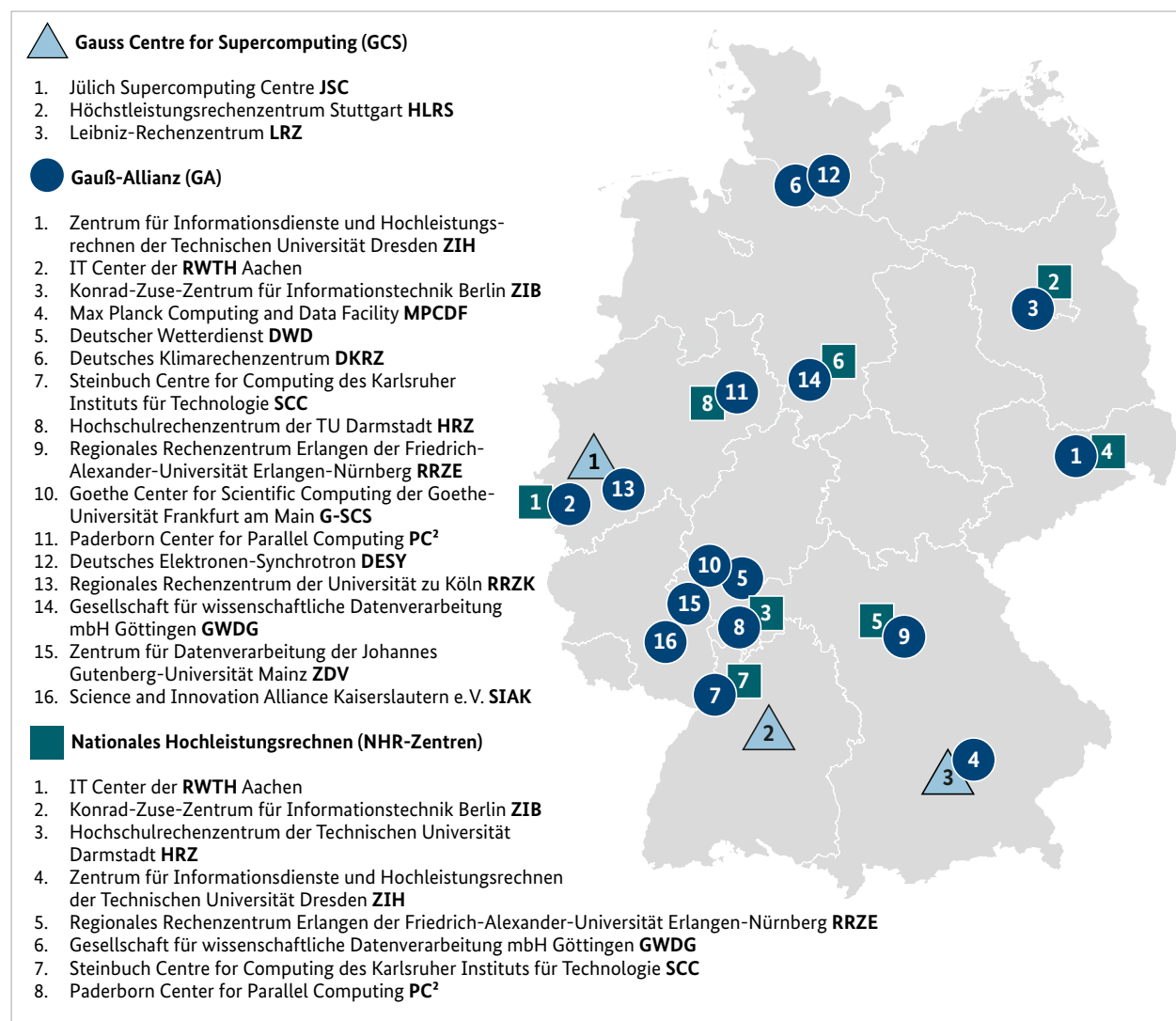


Abbildung 2: HPC-Ökosystem in Deutschland

HPC-Anwendungen in den Ingenieurwissenschaften

Viele Innovationen in industriellen Anwendungen basieren auf neuen Werkstoffen. Simulationen auf Supercomputern können dabei helfen, Werkstoffe mit maßgeschneiderten Eigenschaften zu entwickeln und ihre Verarbeitung zu optimieren.

Bei der Entwicklung beispielsweise von metallischen Werkstoffen, die aus mehreren Komponenten bestehen, eröffnen Simulationen ganz neue Möglichkeiten: Die Eigenschaften der Materialien werden über Mikrostrukturen bestimmt. Diese bilden sich, wenn die Werkstoffe nach der Schmelze erstarren und sind abhängig von den einzelnen Komponenten und den genauen Parametern von Schmelze und Erstarrung. Die Prozesse, die zur Ausbildung der Mikrostrukturen führen, können mit Experimenten nicht untersucht werden. Dafür kann aber die Simulation genau diese entscheidenden Informationen liefern.

Dabei kommt es vor allem auf Genauigkeit an, denn die Simulation muss Werkstoff und Prozesse mit sehr hoher Präzision auflösen. Um einen Werkstoff mit



den gewünschten Eigenschaften zu erhalten, müssen außerdem die Prozessparameter variiert werden. In dem vom BMBF geförderten Projekt SKAMPY wurde hierfür eine Software für Materialsimulationen auf Höchstleistungsrechnern entwickelt. Mit ihrer Hilfe wurde u. a. das Erstarrungsverhalten von Legierungen unterschiedlicher Zusammensetzung untersucht. Damit lassen sich maßgeschneiderte Hochleistungswerkstoffe kostengünstig und schnell am Computer entwerfen.

Unterstützung der Industrie

Viele Unternehmen haben Bedarf an Simulation, Modellierung und Datenanalyse. Vor allem das GCS hat langjährige Erfahrungen in der Zusammenarbeit mit der Wirtschaft. Speziell am GCS-Zentrum in Stuttgart sind die Rechner und die Serviceangebote auf die Bedürfnisse der Industrie zugeschnitten. Auch an anderen HPC-Zentren in Deutschland gibt es gemeinsame Projekte mit der Industrie, die den Transfer in die Anwendung fördern.

Aus- und Weiterbildung

Das High-Performance-Computing setzt qualifizierte Fachkräfte voraus. Die HPC-Zentren in Deutschland fördern die Aus- und Weiterbildung mit einem umfangreichen Angebot. Parallelprogrammierung und Hochleistungsrechnen sind integrale Bestandteile verschiedener Fachrichtungen wie zum Beispiel Informatik und Mathematik. An einigen Standorten gibt es Promotionsprogramme bzw. Graduiertenkollegs in den

sogenannten Computational Sciences. Die Verknüpfung der Fachwissenschaften auf der einen mit dem High-Performance-Computing auf der anderen Seite spielt eine zentrale Rolle für den Ausbau von HPC-Expertise.

Die HPC-Zentren der Ebenen 1 und 2 bieten deutschlandweit umfangreiche themen- und fachspezifische Veranstaltungen und Lehrprogramme an. Allein die GCS-Zentren führen rund 100 Kurse pro Jahr durch. Mit der Beteiligung des GCS an PRACE stehen allen deutschen Anwendenden auch europäisch finanzierte Schulungs- und Weiterbildungsangebote zur Verfügung. Europaweit nehmen weit über 2.000 Personen pro Jahr an diesen Kursen teil, darunter ca. 15 Prozent aus der Wirtschaft.



4 Herausforderungen

4.1 Analyse großer Datenmengen und Anwendungen Künstlicher Intelligenz

Simulation und Modellierung sind die traditionellen Aufgaben des High-Performance-Computing. Künstliche Intelligenz (KI) und die Bearbeitung großer Datenmengen stellen neue und stark anwachsende Aufgaben des HPC dar.

In vielen Bereichen der Wissenschaft werden vielfältige und große Datenmengen erhoben (z. B. Erdsystemforschung, Astro- und Teilchenphysiksysteme, Bildgebung in der Medizin, Sozialwissenschaften). Auch durch Sensornetzwerke (zum Beispiel beim autonomen Fahren) oder bei Simulationen fallen große Datenmengen an. Um derart große Datenmengen zu analysieren, wird ein großes Spektrum an Softwaretechnologien genutzt, von Methoden der Künstlichen Intelligenz, vor allem Deep Learning, bis hin zu statistischen Verfahren. Zur Auswertung mit Hilfe von HPC sind intelligente Kombinationen von Daten- und Rechenressourcen, neue Algorithmen und neue Ansätze beim Zugang zu den Ressourcen notwendig. Daraus erwachsen neue Ansprüche an Hardware, Software, Vernetzung und Kompetenzen, vor allem angesichts der unterschiedlichen Anforderungen an Speicher- und Netzwerkbedarf, der verwendeten Hardware sowie des Zugangs zu den Systemen. Während Analysen großer Datenmengen speicherintensiv sind und eine lange Laufzeit haben, nutzen Anwendungen der Künstlichen Intelligenz häufig spezielle Hardware und stellen hohe Anforderungen an die Vernetzung. Auch flexible und interaktive Nutzung ist für solche Anwendungen wichtig. Dies er-

fordert auch Cloud-artige Zugänge und vorinstallierte, kommerzielle Software. Für alle Nutzungsarten müssen geeignete Zugangs- und Vergabeverfahren entwickelt werden, um die ganze Breite der Anwenderinnen und Anwender passgenau zu bedienen.

4.2 Steigende Komplexität von Anwendungen und Rechnern

Deutliche Steigerungen der Rechenleistung sind erforderlich, um durch Simulation und Modellierung neuartige Erkenntnisse erzielen zu können. In der Klima- und Erdsystemforschung sind Fortschritte nur durch höhere Auflösung der Modelle zu erreichen, damit weitere, signifikante physikalische Prozesse berücksichtigt werden können. Um pharmazeutische Moleküle mit ganz spezifischen Wirkmechanismen oder komplexe Materialien zum Beispiel für die organische Elektronik entwickeln zu können, sind umfangreiche Berechnungen erforderlich, die heute noch nicht durchgeführt werden können. In den Ingenieurwissenschaften steigt der Bedarf nach Rechenleistung, um nicht nur einzelne Teile, sondern beispielsweise auch komplette Flugzeuge simulieren und so ihre Effizienz optimieren zu können.

Die Rechenleistung von Prozessoren hat sich bislang etwa alle zwei Jahre verdoppelt. Erreicht wurde dies durch fortschreitende Miniaturisierung und seit einigen Jahren zusätzlich durch die Integration von mehreren Rechenkernen auf einem Chip. Durch die größere Zahl von Rechenkernen pro Prozessor und die immer größere Zahl der Prozessoren werden HPC-Systeme aber auch immer komplexer. So hat zum

Beispiel der Rechner am HLRS in Stuttgart über 700.000 Rechenkerne. Dies führt zu höheren Anforderungen an die Skalierbarkeit von Anwendungen und stellt viele Anwenderinnen und Anwender vor große Herausforderungen.

Weitere Leistungssteigerungen werden durch die Integration anderer Prozessortypen, insbesondere sogenannter GPUs (Graphics Processing Unit), sowie durch spezielle Speicher und Netzwerktechnologien erreicht. Die Architektur von HPC-Systemen wird damit komplexer und leistungsfähiger, aber auch ihre Programmierung deutlich anspruchsvoller. Vorhandene Algorithmen und Software müssen ständig an neue Systeme angepasst werden, um Leistung und Kosteneffizienz zu optimieren. Diese Anpassung an massiv parallele Systeme mit komplexer Architektur stellt insbesondere bei älteren Algorithmen und älterer Software eine Herausforderung dar.

Der Anstieg der Datenmengen und die verteilte Nutzung von HPC-Ressourcen stellen auch erhöhte Anforderungen an das Management und die Vernetzung der Rechen- und Datenzentren. Gelöst werden kann dies nur mit leistungsfähigeren Breitbandverbindungen oder auch der teilweisen Verarbeitung von Daten bereits am Ort der Entstehung (Edge-Computing).

4.3 Verbesserung der Energieeffizienz

Leistungsfähige und effiziente Rechenzentren sind die notwendige Voraussetzung für eine auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Digitalisierung. Der hohe Energiebedarf von Rechenzentren ist eine große Herausforderung bei der Erreichung von Klimaschutzziele. Dies betrifft auch Supercomputer: Der aktuell schnellste Rechner der Welt benötigt knapp 30 Megawatt elektrischer Leistung, so viel wie drei ICE-Züge. Daneben macht der hohe Energieverbrauch den Betrieb von Supercomputern auch kostspielig. Durch die immer höheren Rechenleistungen steigt der Anteil der Betriebskosten an der Gesamtinvestition. Lag dieser Anteil früher im einstelligen Prozentbereich, so sind es heute mindestens 40 Prozent mit steigender Tendenz.

4.4 Nutzung neuer Rechentechnologien

Jeder Prozessor, ob im Smartphone oder in einem HPC-System, nutzt den gleichen prinzipiellen Aufbau (von-Neumann-Architektur). Bei großen HPC-Systemen stößt diese Architektur mittlerweile an ihre Grenzen



HPC-Anwendung in der Industrie

Obwohl in Deutschland die Zahl der Arbeitsmaschinen (zum Beispiel Bau- oder Erntemaschinen) weitaus geringer ist als die Zahl der Pkw, ist deren gesamter Kraftstoffverbrauch vergleichbar. Die Arbeitsmaschinen müssen hohe Leistungen erbringen, haben aber teilweise einen sehr schlechten Wirkungsgrad. Um den Wirkungsgrad solcher Arbeitsmaschinen zu optimieren, werden bei ihrer Entwicklung meist reale Prototypen eingesetzt, die sämtliche Komponenten beinhalten und auf einem aufwändigen Prüfstand untersucht werden.

Wesentlich schneller und effektiver gelingt dies mit virtuellen Prototypen, den sogenannten „Digitalen Zwillingen“. Hierzu wird das Gesamtverhalten der Arbeitsmaschine virtuell auf einem Rechner nachgebildet. Allerdings sind hier leistungsfähige Rechner notwendig. In den vom BMBF geförderten Projekten HPC-OM und



PARADOM wurden sogar komplette Fertigungsstraßen simuliert und hinsichtlich ihres gesamten Energieverbrauchs optimiert.

und führt zu Einbußen bei der Prozessorleistung: Zum einen konkurrieren Daten und Verarbeitungsbefehle in den Prozessoren um die gleichen Ressourcen. Zum anderen ist die Verarbeitungsgeschwindigkeit viel stärker gestiegen als die Geschwindigkeit, mit der Daten innerhalb (und außerhalb) von Prozessoren verschoben werden können. Zusammen führt dies dazu, dass vor allem große Datenmengen nicht optimal verarbeitet werden können.

Aktuell eröffnen sich verschiedene Ansätze für grundlegend neue Technologien des Rechnens: Zum einen durch neuartige Bauelemente wie Memristoren, zum anderen durch disruptive Konzepte des Beyond-von-Neumann-Trends, wie beispielsweise Rechnen-im-Speicher und neuromorphe Chips. Völlig neue Möglichkeiten eröffnet auch die Entwicklung von Quantencomputern.

Das HPC nimmt bei der Erprobung bzw. Nutzung neuer Rechentechnologien wie Quanten- und neuromorphem Computing eine wichtige Rolle ein. So sind HPC-Systeme vorteilhaft für die Systemsteuerung und die Vor- und Nachbereitung der Daten im Rahmen hybrider HPC-Quantencomputing-Systemansätze.

Zudem können Quantencomputer vorab im Rechner simuliert und erforscht werden.

Parallel zur Erforschung und Entwicklung neuartiger Rechnertechnologien werden diese zukünftig auch in herkömmliche HPC-Systeme integriert. Die Entwicklung solch extrem heterogener Systeme stellt allerdings völlig neue Anforderungen sowohl an Hard- als auch Software.

4.5 Technologische Souveränität in Europa

Der Treiber für digitale Innovationen sind Daten und deren Verarbeitung, die oft erst durch HPC- und KI-Techniken möglich wird. Big-Data-, Machine-Learning- und Data-Analytics-Anwendungen werden – auch für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) – immer wichtiger. Für Unternehmen spielen die Anforderungen an Sicherheit und Vertraulichkeit eine große Rolle. Auch müssen sich Anwendungen nahtlos in die unternehmensinternen Abläufe eingliedern, um wirtschaftlich und produktiv zu sein. Nur durch eigene Forschung

und Entwicklung können Deutschland und Europa digitale Innovationen ermöglichen und technologisch souverän agieren.

Beim Einstieg in das High-Performance-Computing stehen Anwendende aus der Industrie aber oftmals vor hohen Hürden. Programme, die auf kleineren, weniger leistungsfähigen Rechnern lauffähig sind, sind nicht ohne weiteres auf große Systeme übertragbar, weil leistungsfähige Supercomputer spezielles Know-how erfordern. Es fehlt in den Unternehmen an entsprechenden Kompetenzen und passenden Unterstützungsangeboten bzw. an Anforderungen der Industrie zugeschnittenen Services und Transferaktivitäten der HPC-Zentren. Nur der Aufbau eigener Kompetenzen steigert Wettbewerbsfähigkeit und technologische Souveränität.

Bei der Entwicklung neuer Rechnertechnologien sowie zukünftiger energieeffizienter Exascale-Systeme ist Europa vor allem bei Hochleistungsprozessoren und Netzwerktechnologien von Lieferungen und Know-how von außerhalb der EU abhängig. Eine Bündelung der europäischen Expertise kann dazu genutzt werden, einseitigen Abhängigkeiten entgegenzuwirken und so die technologische Souveränität auszubauen. So können Deutschland und Europa auch in internationalen Kooperationen ihren Zugang zu Hochtechnologie sichern.



5 Ziele

Aus den grundlegenden Thesen zur Bedeutung von HPC für Forschung, Wertschöpfung und technologischer Souveränität und den damit verbundenen Herausforderungen leiten sich fünf übergeordnete Ziele des Programms ab. Die Vernetzung mit anderen Programmen der Bundesregierung und die Verzahnung mit den Programmen der EU sichern dabei die Kohärenz aller Maßnahmen.

5.1 Deutschland als Spitzenreiter positionieren

Das BMBF wird sich – gemeinsam mit den Bundesländern – dafür einsetzen, das deutsche HPC-Ökosystem weiterhin an der Spitze zu halten. Dazu gehören das umfangreiche Leistungsangebot für die Anwendergruppen, die hohen Kompetenzen in Software- und Hardwaretechnologien und der wirksame Transfer in die Wirtschaft.

Energieeffizientes HPC

Supercomputer stellen extreme Rechenleistung für viele Anwendungsbereiche zur Verfügung. Ihr Betrieb benötigt jedoch sehr viel Energie. Ein Höchstleistungsrechenzentrum verbraucht etwa 30 Millionen kWh pro Jahr – so viel wie eine deutsche Kleinstadt. Die meiste Energie verbrauchen die vielen tausend Prozessoren.

Ein Beitrag zu mehr Energieeffizienz können sogenannte FPGAs (Field Programmable Gate Array, feldprogrammierbare Logikgatter) sein. Im Gegensatz zu den üblichen Universalprozessoren kann die Schaltung eines FPGA dynamisch verändert werden, wodurch sich ein FPGA optimal an den zu berechnenden Algorithmus anpassen kann. Diese Spezialisierung führt zu einem wesentlich geringeren Stromverbrauch. Allerdings eignen sich FPGAs nicht für alle Rechenaufgaben und ihre Programmierung ist komplex.

Üblicherweise werden FPGAs in eingebetteten Systemen genutzt. Dies ist dort wesentlich einfacher und



kostengünstiger als einen Spezialprozessor herstellen zu lassen. Um FPGAs auch in HPC-Systeme integrieren zu können, wird intensiv an der anwendungsfreundlichen Programmierung geforscht, unter anderem in dem BMBF-geförderten Projekt ORKA-HPC. Neben der direkten Steigerung der Energieeffizienz von Supercomputern sind die Forschungsergebnisse auch für die Nutzung von FPGAs in eingebetteten Systemen relevant.

5.2 Exzellente und innovative Forschungsergebnisse ermöglichen

In Deutschland soll der Bedarf an Rechenzeit für exzellente wissenschaftliche Projekte flächendeckend und zeitnah bedient werden können. Auch wissenschaftliche Communities mit Bedarf an Rechenzeit vor allem für die Analyse großer Datenmengen und KI-Anwendungen sollen mit passenden Angeboten an Rechenressourcen ihre Forschung auf Spitzenniveau durchführen können. Für alle Vorhaben müssen die vorhandenen Ressourcen hocheffizient ausgenutzt werden. Dazu gilt es auch, die technologischen Hürden zwischen HPC und der Analyse großer Datenmengen abzubauen und HPC für Künstliche Intelligenz weiterzuentwickeln.

5.3 Innovative Wertschöpfung in Deutschland ermöglichen

Unternehmen, insbesondere KMU, sollen künftig intensiver die vorhandenen HPC-Kompetenzen der Wissenschaft in Deutschland und Europa einsetzen, um innovative Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln. Es gilt, die Hürden für den Einsatz von HPC abzubauen und gemeinsam mit Unternehmen Kompetenzen aufzubauen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Wirtschaft großen Wert auf vertrauenswürdige und einfach nutzbare HPC-Anwendungen legt. Dies trägt nicht nur zu innovativer Wertschöpfung, sondern auch zu digitaler und technologischer Souveränität Deutschlands bei.

5.4 Technologische Souveränität und Energieeffizienz stärken

Das BMBF will auch künftig leistungsfähige Infrastrukturen für exzellente Wissenschaft und innovative Wertschöpfung in Deutschland zur Verfügung stellen. Dazu müssen die technologischen Grundlagen von HPC, sowohl die Hardware als auch die nötige Software, weiterentwickelt werden. Dies sichert zum einen die souveräne Beherrschung der nötigen Technologien zur aktiven Gestaltung der Digitalisierung. Zum anderen qualifiziert es deutsche und europäische Unternehmen im weltweiten Wettbewerb. Die Beschaffung und Nutzung konkurrenzfähiger europäischer Technologien im HPC unterstützt diese Unternehmen zusätzlich und trägt zur Wertschöpfung in Deutschland und Europa bei.

Die Steigerung der Effizienz von Informations- und Kommunikationstechnologien ist ein übergreifendes Ziel der Bundesregierung. Dazu ist es notwendig, die Energieeffizienz beim HPC mit ganzheitlichen Ansätzen zu erhöhen. Konzepte und Maßnahmen sollen auch auf kommerzielle Rechner und Rechenzentren ausstrahlen und helfen, die IKT-Infrastruktur in Deutschland effizienter und nachhaltiger zu gestalten.





6 Maßnahmen

Um den anstehenden Herausforderungen im HPC zu begegnen und die Programmziele zu erreichen, wird das BMBF eine Reihe von Maßnahmen umsetzen. Für den langfristigen Erfolg ist eine enge Verzahnung der Maßnahmen und eine Abstimmung mit den relevanten Akteurinnen und Akteuren wichtig. Insgesamt wird das BMBF in den Jahren 2021–2024 306 Mio. Euro für das Programm aufwenden. Das BMBF strebt an, weitere Mittel insbesondere für den Exascale-Ausbau bereitzustellen. Diese Mittel werden erheblich verstärkt durch Kofinanzierungen der Länder in Höhe von 225 Mio. Euro und der Europäischen Union in Höhe von über 50 Mio. Euro.

6.1 Mit den Ländern eng zusammenarbeiten

Die HPC-Leistungspyramide in Deutschland wird von Bund und Ländern in unterschiedlichen Konstellationen getragen. Die enge Abstimmung mit den Ländern ist daher ein Erfolgsfaktor für die bundesweite Versorgung mit Rechenleistung auf allen Ebenen der Leistungspyramide und für einen umfassenden Kompetenzausbau.

6.2 Europäisches Ökosystem weiterentwickeln

Das BMBF setzt sich im Rahmen von EuroHPC für eine führende Rolle der deutschen Einrichtungen und für die Förderung exzellenter und strategisch wichtiger Vorhaben ein. Zentrale Anliegen sind die Ausrichtung von EuroHPC am Bedarf der Anwendenden aus

Wissenschaft und Wirtschaft, die Zugänglichkeit eines europaweit differenzierten HPC-Angebotes für alle Nutzenden sowie die Förderung von Softwaretechnologien. Die europaweite Vergabe von Rechenzeit für die Wissenschaft soll auf bewährte und exzellenzgeleitete Verfahren setzen. Durch Entwicklung europäischer Hardware- und Softwaretechnologien soll EuroHPC zur technologischen Souveränität beitragen.

Durch die Abstimmung sowohl mit den Ländern als auch auf europäischer Ebene strebt das BMBF die Anschlussfähigkeit und Komplementarität der nationalen und internationalen Maßnahmen an.

Kurz gesagt

Was wollen wir erreichen:

- Nationale und europäische Maßnahmen ergänzen sich.
- Deutsche Partner beteiligen sich umfangreich an Maßnahmen von EuroHPC.
- Deutschland nimmt beim HPC eine führende Rolle in Europa ein.

Wie wollen wir unsere Erfolge messen:

- Anzahl der Nutzenden aus Deutschland an europäischen Systemen und umgekehrt
- Deutsche Beteiligung an und die Koordination von europäischen Verbundvorhaben
- Rückfluss von EU-Mitteln nach Deutschland

6.3 Möglichkeiten erweitern

Um den weiterhin steigenden Bedarf an Rechenzeit zu bedienen, müssen die Kapazitäten auf allen Ebenen der

Leistungspyramide kontinuierlich ausgebaut werden. Das BMBF wird – gemeinsam mit den Ländern – den Ausbau der Kapazitäten im GCS, beim NHR und in den nationalen Kompetenzzentren für KI-Forschung weiter fördern.

Entscheidend sind dabei nicht Spitzenplatzierungen in der populären Weltrangliste der Supercomputer (sogenannte „Top-500-Liste“), sondern ein wohldifferenziertes System an Rechnern verschiedener Leistungskategorien und Spezialfähigkeiten, die an den Bedarfen der Nutzenden ausgerichtet sind. Dazu gehört auch, dass praktikable Software sowie die für das Computing und die Aufbereitung der Daten, Modelle und Ergebnisse nötigen Werkzeuge zur Verfügung stehen (siehe 6.6 Neue Technologien erforschen). Nur in dieser Gesamtheit können HPC-Kapazitäten in der Breite genutzt werden und ihr volles Potenzial für Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft entfalten.

Ausbau der Spitzenleistung

Das BMBF strebt an, die Kapazitäten an allen Standorten des GCS – Jülich, München und Stuttgart – weiter auszubauen. Der alternierende Ausbau und die enge Vernetzung soll jederzeit die Verfügbarkeit von Spitzenleistung in Deutschland und eine kontinuierliche Erneuerung der Systeme sichern. An allen Standorten soll in der Programmlaufzeit eine Leistung erreicht werden, die bis in den Exascale-Bereich hinein den

wachsenden Bedarfen von Forschung und Wirtschaft gerecht wird. Im Vordergrund steht dabei die reale Anwendungsleistung für die Nutzungsgruppen und die effiziente Auslastung der Systeme.

Zu dem umfassenden Ausbau gehört zum einen die Beschaffung von Systemen der höchsten Leistungsklasse, zum anderen die Weiterentwicklung der Rechnerinfrastruktur an den Zentren. Den Ausbau wird das BMBF gemeinsam mit den Ländern Bayern, Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen paritätisch finanzieren.

Für das erste deutsche Exascale-System unterstützt das BMBF eine Bewerbung des GCS auf einen europäisch kofinanzierten Rechner im Rahmen von EuroHPC. Als Standort wird das Jülich Supercomputing Centre angestrebt. Dieser europäische Exascale-Rechner wird anteilig Anwendungsgruppen aus ganz Europa offenstehen. Damit soll Deutschland eine technologische Vorreiterrolle für die anspruchsvollsten Anwendungen in Europa übernehmen.

Möglichkeiten für Hochschulen und Forschungseinrichtungen erweitern

Auf Ebene 2 der Leistungspyramide wird das BMBF ab 2021 jährlich bis zu 31,25 Mio. Euro für den gemeinsam mit den Ländern vorangetriebenen Auf- und Ausbau des Nationalen Hochleistungsrechnens (NHR)

HPC in der Klimaforschung

Wolkenbildung und Niederschlag sind entscheidende Faktoren in der Modellierung von Klima und Wetter. Die Bildung von Wolken ist aber ein hochkomplexer physikalischer Prozess und sehr aufwändig zu simulieren. Viele Unsicherheiten derzeitiger Klimamodelle beruhen auf fehlendem Verständnis für die Wolkenbildung. Um durch bessere Simulation von Wolken und Niederschlag präzisere Klimavorhersagen zu erreichen, müssen vorhandene Klimamodelle deutlich erweitert und auf Höchstleistungsrechner angepasst werden. Dies wird u. a. in der vom BMBF geförderten Initiative „High Definition Cloud and Precipitation for Advancing Climate Prediction HD(CP)²“ verfolgt. Hier haben Forschende mithilfe von extrem genauen Simulationen die Wolkenbildung untersucht. Unter anderem fanden

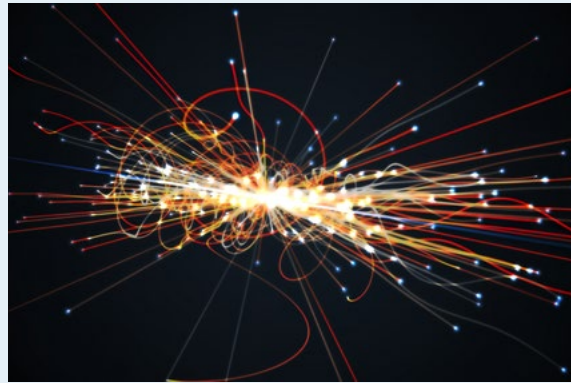


sie dabei heraus, wie Wolken auf Veränderungen von Aerosolen in der Umgebung reagieren und wie Stürme durch Wolken beeinflusst werden.

HPC in der Teilchenphysik

Die uns umgebende Materie besteht aus Molekülen und Atomen. Der Kern der Atome ist aus Neutronen und Protonen aufgebaut, die sich wiederum aus noch kleineren Materiebausteinen zusammensetzen, den Quarks. In umfangreichen Experimenten an den größten Teilchenbeschleunigern der Welt haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Massen von Protonen und Neutronen untersucht. Es war bereits bekannt, dass die gemessenen Werte nicht einfach durch die Summe der Quark-Massen erklärt werden können. Es fehlte aber eine Erklärung für dieses Phänomen.

In bahnbrechenden Simulationen, durchgeführt u. a. auf Supercomputern in Deutschland, konnte das Rätsel gelöst werden. Bei der Berechnung der Massen müssen alle Wechselwirkungen der Quarks nicht nur untereinander, sondern auch zum Beispiel mit elektromagne-



tischen Kräften berücksichtigt werden. So konnte die geringe Massedifferenz zwischen dem Proton und Neutron erklärt werden. Durch die Computersimulationen ist es gelungen, physikalische Phänomene der kleinsten Bausteine des Universums aufzuklären.

an Hochschulen zur Verfügung stellen. Diese werden durch Mittel der Länder in gleicher Höhe ergänzt. Die Mittel dienen der Finanzierung des NHR-Verbundes, der Beschaffung von Rechnern und Rechnerinfrastruktur sowie dem Betrieb und der wissenschaftlichen Fachberatung für die Anwenderinnen und Anwender. Dabei wird eine möglichst breite Abdeckung aller Anwendungsbereiche von HPC angestrebt. Weitere Aufgaben des NHR sind die Stärkung der Methodenkompetenz der Nutzerinnen und Nutzer, die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, die Aus- und Weiterbildung sowie die Förderung und Weiterentwicklung des wissenschaftlichen Rechnens. Bund und Länder entwickeln so die fachlichen und methodischen Stärken von Hochleistungsrechenzentren in einem nationalen Verbund weiter.

Hinzu kommen die Investitionen der durch das BMBF institutionell geförderten Forschungseinrichtungen für ihre eigenen Rechenzentren, die zu Ebene 2 und 3 der Leistungspyramide zählen. Diese sind meist für spezielle Forschungsfelder konzipiert und beschränken deshalb ihre Rechenzeit auf bestimmte Anwendungen.

Forschende an Hochschulen und außeruniversitären Einrichtungen können damit deutschlandweit und

bedarfsgerecht auf die für ihre Forschung benötigte Rechenkapazität zugreifen.

KI-Entwicklung unterstützen

Angewandte KI-Forschung ist sehr stark von der Verfügbarkeit von Rechenkapazitäten abhängig, die das schnelle Erproben neuartiger oder angepasster Verfahren für innovative Vorhaben der KI-Forschung ermöglicht. Durch den Aufbau einer leistungsstarken IT-Infrastruktur im Netzwerk der nationalen Kompetenzzentren für KI-Forschung will das BMBF dazu beitragen, einen international konkurrenzfähigen Forschungsverbund auf höchstem Niveau zu etablieren. Bestehen soll diese IT-Infrastruktur einerseits aus Experimentalsystemen, welche die Entwicklung von KI-Algorithmen unterstützen, und andererseits aus Systemen zur hochperformanten Datenanalyse (HPDA), die die Daten zur Erprobung von neuen KI-Algorithmen bereitstellen. Diese Systeme werden der gesamten KI-Forschung in Deutschland zur Verfügung gestellt und können um neue Rechnertechnologien erweitert werden.

Ausbau auf Bedarfe und Herausforderungen zuschneiden

Das BMBF unterstützt eine Beschaffung, die auf jeder

Ebene und auch zwischen den Ebenen abgestimmt ist. Die Gauß-Allianz fördert dabei den gegenseitigen Austausch der Rechenzentren. Eine enge Abstimmung findet insbesondere zwischen GCS und NHR statt, um ein möglichst durchgehendes und leistungsfähiges Angebot für hohe und höchste Anforderungen zur Verfügung zu stellen. Hierzu dienen auch wechselseitige Mitgliedschaften in den jeweiligen Beratungsgremien.

Der Aus- und Aufbau von Rechenkapazitäten soll folgende Aspekte berücksichtigen:

- Im Gesamtportfolio der Beschaffungen sollen die spezifischen Bedarfe der wissenschaftlichen Communities möglichst umfänglich berücksichtigt werden. Für alle wissenschaftlichen Communities und für die Bedarfe der Wirtschaft soll in Deutschland ein passendes Angebot zur Verfügung stehen. Dies betrifft u. a. die Rechnerarchitektur, die Speicherbedarfe und die Vernetzung.
- Für die Anforderungen anspruchsvoller Anwendungen zur Künstlichen Intelligenz sollen spezielle Angebote geschaffen werden. Dies gilt insbesondere für die innovative Kombination von Methoden der KI mit klassischen HPC-Anwendungen und der Analyse großer Datenmengen. Dazu sind auch die technologischen Hürden bei den unterschiedlichen Anforderungs-, Ausführungs- und Zugangsmodi zwischen KI-Anwendungen, HPC und HPDA abzubauen (siehe 5.2 Exzellente und innovative Forschungsergebnisse ermöglichen).
- Die Energieeffizienz der Systeme und ihres Betriebs soll weiter gesteigert werden. Neben der Berücksichtigung bei der Beschaffung soll dies durch die Förderung effizienter Technologien und Algorithmen ergänzt werden (siehe 5.4 Technologiesouveränität und Energieeffizienz stärken). Auch die Anwenderinnen und Anwender sollen zu den Bemühungen um höhere Effizienz und Nachhaltigkeit der Systeme beitragen; durch Information über den Stromverbrauch ihrer Programme oder auch durch Betriebsregeln, wie der Begrenzung des Stromverbrauchs. Um die Anwendenden dabei zu unterstützen, wird beispielsweise im GCS und im NHR insbesondere die Anwendungsberatung gefördert.

Leistungsfähige Vernetzung

Eine leistungsfähige Verbindung zwischen HPC-Zentren ist notwendig, um verteilte große Datenmengen mit den verteilten Rechenzentren zusammenbringen zu können. Für eine europaweite Nutzung von HPC-Systemen ist eine schnelle und ausfallsichere Vernetzung der Zentren unverzichtbar. In Europa steht die Terabitvernetzung der zukünftigen Exascale-Systeme über das europäische Wissenschaftsnetz GÉANT auf der Agenda des Gemeinsamen Unternehmens EuroHPC. In Deutschland unterstützt das BMBF eine Erhöhung von Interoperabilität und Leistungsfähigkeit der nationalen Vernetzung.

Kurz gesagt

Was wollen wir erreichen:

- Die Spitzenleistung des GCS ist durch Bund und Länder massiv ausgebaut.
- Das GCS ist Standort eines europäischen Exascale-Systems.
- Die Rechenmöglichkeiten für Hochschulen und Forschungseinrichtungen sind deutlich erweitert.
- Anwendungen Künstlicher Intelligenz beim HPC werden unterstützt.
- Der Ausbau der Rechenleistung ist auf Bedarf und Herausforderungen zugeschnitten.
- Die Rechenzentren sind durch leistungsfähige Netze verbunden.

Wie wollen wir unseren Erfolg messen:

- Verfügbare Leistung und Positionierung in internationalen Ranglisten. Mit der größeren Anwendungsbreite, die die künftigen Systeme adressieren, ist nicht die Top-500-Liste maßgeblich. Eine breitere Bewertungsbasis bezieht auch Ranglisten wie die Green-500-Liste und anwendungsnähere Benchmarks wie die HPCG, HPL-AI und Graph-500 mit ein.
- Wartezeit für Anwenderinnen und Anwender, bis Rechenzeit zur Verfügung steht
- Auslastung der Systeme
- Verlauf der Effizienz-Kennzahlen (PUE, KPI4DCE u. a.)
- Nutzung der Systeme durch Industrie; KMU-Anteil
- Breite der wissenschaftlichen Disziplinen unter den Nutzenden und verstärkte Nutzung durch KI-Community
- Reale Bandbreite der Vernetzung

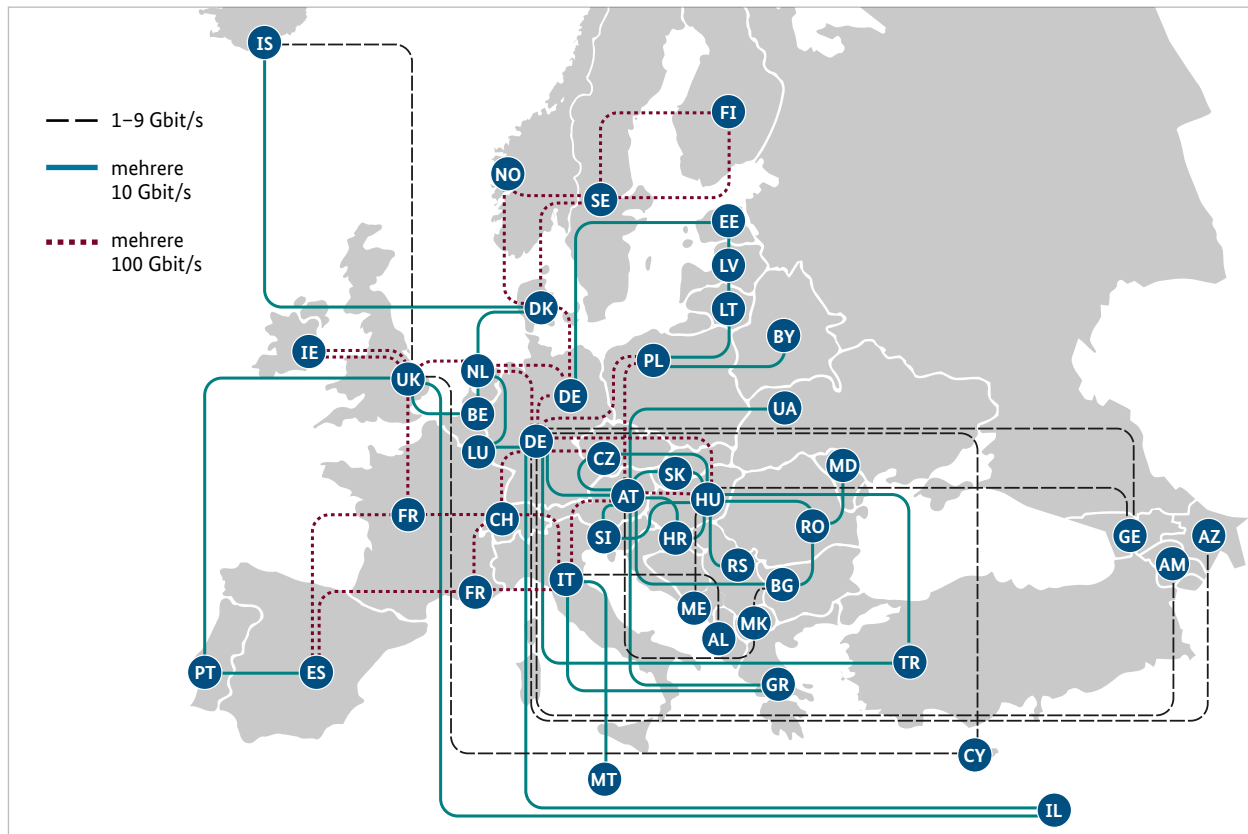


Abbildung 3: Das GÉANT-Netz verbindet die nationalen Forschungs- und Bildungsnetze Europas miteinander und bietet allen europäischen HPC-Standorten Zugang zu unbegrenzter Bandbreite.

6.4 Zugänge vereinfachen

Ein communityorientierter Ansatz sichert eine umfassende Versorgung mit Rechenzeit in der Breite der wissenschaftlichen Disziplinen. Dabei ist sicherzustellen, dass auch neu entstehende Communities sowie inter- und transdisziplinäre Projekte bei der Vergabe ausreichend berücksichtigt werden.

Das BMBF unterstützt einheitliche und interoperable Zugangsverfahren bei GCS und NHR auf Grundlage der Prinzipien Fairness, Objektivität und Transparenz. Kriterien für den Zugang sollten neben wissenschaftlicher Exzellenz bzw. Innovationshöhe auch die Effizienz der benutzten Software und Angemessenheit der genutzten Systeme berücksichtigen.

Die Ressourcen des GCS stehen dabei in einem wissenschaftsgeleiteten Vergabeprozess allen wissenschaftlichen Anwendenden aus Deutschland zur Verfügung.

Für das NHR-Programm soll ein bundesweit koordiniertes Verfahren zur wissenschaftsgeleiteten Vergabe der Nutzungskapazitäten für Hochschulangehörige implementiert werden.

Neben dem klassischen antragsbasierten Zugang müssen verstärkt neue interaktive Zugangswege etabliert werden. Diese sollen unter anderem auf die Bedarfe von KI-Anwendungen und Datenanalyse zugeschnitten sein und einen einfachen Zugriff auf hohe Rechenleistungen und Speichermöglichkeiten erlauben. Gegenüber dem traditionellen Batchbetrieb, also dem sequenziellen Abarbeiten von Rechenaufträgen, stellen solche Zugänge neue Anforderungen an den Betrieb und das Management von Hoch- und Höchstleistungsrechnern. Die Rechenzentren sollen sich gemeinsam mit den Anwendenden dieser Herausforderung stellen. Zur möglichst effizienten Nutzung der Systeme soll auch die Codeeffizienz als ein Zugangskriterium berücksichtigt und der Kompetenzaufbau bei den Nutzenden in diesem Bereich gefördert werden.

Das BMBF strebt eine enge Verbindung zwischen European Open Science Cloud (EOSC) und Nationaler Forschungsdateninfrastruktur (NFDI) auf der einen Seite sowie GCS und NHR auf der anderen Seite an. Die intelligente Kombination von Daten- und Rechenressourcen wird die Leistungsfähigkeit der Wissenschaft signifikant erhöhen. Dazu sind neue Technologien und Zugangsarten für innovative datengetriebene Projekte nötig. Die heterogenen Rechen- und Datenressourcen sollen durch geeignete Software und Middleware intelligent zusammengeführt werden. Das Zusammenwachsen von High-Performance- und High-Throughput-Computing soll gestärkt werden, zum Beispiel durch Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Technologietreibern wie dem CERN.

Perspektivisch soll ein deutschlandweiter förderierter Zugang zu Rechen- und Datenressourcen aufgebaut werden. Dies soll durch die Entwicklung und Implementierung systemübergreifender Workflows ermöglicht werden. Erste Schritte dazu werden unter anderem mit dem laufenden Vorhaben InHPC am GCS unternommen.

Für die Wirtschaft

Für Anwendende aus der Wirtschaft sollen vor allem sichere und vertrauenswürdige Zugänge etabliert und eine Kompatibilität zu unternehmensinternen Workflows unterstützt werden. Dazu soll zunächst auf Ebene 1 das Angebot an Services und Unterstützungsleistungen ausgebaut werden. Unter Berücksichtigung der GAIA-X-Prinzipien kann zum Beispiel „HPC as a Service“ zunächst beim GCS entwickelt und implementiert werden. Insbesondere für KMU soll dieser Zugangsweg Hürden abbauen und die Nutzung fortschrittlicher Simulations- und Datenanalysetechnologien befördern.

Die bestehenden Zugangsverfahren zu Rechenzeit auf nationaler und europäischer Ebene sind hauptsächlich wissenschaftsgeleitet. Daneben soll, wo möglich, ein „Fast Track“ für vorwettbewerbliche Forschungs- und Entwicklungsprojekte aus der Wirtschaft eingerichtet werden. Die Umsetzung eines solchen Zugangs muss besondere Rücksicht auf die hohen Anforderungen an Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit nehmen. In einem nächsten Schritt soll in geringem Umfang auch die kommerzielle Nutzung von Rechenressourcen ermöglicht werden.

HPC in den Lebenswissenschaften

Menschliche Zellen benötigen Insulin, um den im Blut gelösten Zucker aufnehmen zu können. Das Insulin dockt dazu an speziellen Rezeptoren der Zellen an und verändert damit die Struktur des Rezeptors, man spricht auch von dessen Aktivierung. Dies löst eine Folge von Signalen in der Zelle aus und stößt vielfältige Prozesse an wie beispielsweise die rasche Verarbeitung des Blutzuckers.

Um diese Vorgänge besser verstehen zu können und eventuelle Therapiemöglichkeiten bei Erkrankungen zu entwickeln, versucht die Forschung, den Insulinrezeptor experimentell zu untersuchen. Aufgrund seiner geringen Größe und Positionierung an der Zelle ist der Insulinrezeptor mit Experimenten allerdings kaum zu untersuchen. Mit Supercomputern dagegen können sogar der molekulare Aufbau des Rezeptors dargestellt und die Vorgänge während der Insulinbindung direkt simuliert werden.



Auf einem der leistungstärksten deutschen Supercomputer wurde zwei Jahre lang gerechnet. Unter anderem stellte sich dabei heraus, wie das Insulin beim Andocken am Rezeptor innerhalb von 20 Mikrosekunden seine Struktur verändert und den Rezeptor aktiviert.

Staatliche Einrichtungen, wie zum Beispiel Behörden, haben ebenfalls Bedarf an hohen und höchsten Rechenleistungen. Zugangswege und Kooperationsmöglichkeiten sollen auch für diese Anwendungsgruppe geschaffen werden.

Kurz gesagt

Was wollen wir erreichen:

- Die verschiedenen Zugangsverfahren für Rechenzeit sind interoperabel.
- Neue und interaktive Zugangswege, insbesondere für datenlastige Anwendungen, sind etabliert.
- Für die Wirtschaft bestehen sichere und vertrauenswürdige Zugänge.

Wie wollen wir unseren Erfolg messen:

- Umsetzung interoperabler Zugangsverfahren
- Nutzung der Systeme durch Industrie
- Anteil der neuen Nutzenden aus Wissenschaft und Industrie
- Anteil interaktiver Anwendungen
- Anteil von Anwendungen unter Verarbeitung großer Datenmengen

6.5 Kompetenzen stärken

Interdisziplinäre Zusammenarbeit fördern

Die Effizienzsteigerung von HPC-Systemen und Anwendungssoftware erfordert die Zusammenarbeit verschiedenster Disziplinen und Anwendungen – von Mathematik und Informatik bis hin zu Biologie und

Teilchenphysik. Und da moderne HPC-Systeme immer heterogener werden, wird das Zusammenspiel von Hard- und Software (sog. Co-Design) in Zukunft immer wichtiger, was wiederum eine gewisse Interdisziplinarität voraussetzt.

Für notwendige Infrastruktur- und Unterstützungsaufgaben sollen daher Anreize geschaffen werden. Diese Aufgaben reichen von der Unterstützung der Nutzenden über Codeoptimierung bis hin zur langfristigen Pflege und Wartung von Codes. Die Reputation dieser, teilweise nicht primär wissenschaftlichen, Aufgaben soll gestärkt werden. Dies kann zum Beispiel über Koautorenschaften geschehen oder durch Anerkennung solcher Aufgaben, beispielsweise bei Berufungen.

Die Vernetzung der Beteiligten, die vor allem durch die Gauß-Allianz vorangetrieben wird, ist ein entscheidender Erfolgsfaktor für die effiziente Nutzung von HPC-Ressourcen, aber auch für die Weiterentwicklung von HPC-Technologie und -Anwendungen. Mit der Förderung im HPC-Programm stärkt das BMBF Aktivitäten, die explizit den Austausch und Dialog im Blick haben. Eine jährliche Konferenz ist ein geeignetes Format, um den nationalen HPC-Anbietenden und Anwendenden aus Wissenschaft und Wirtschaft eine Austauschplattform zu bieten. Zudem werden mit dem NHR die standortübergreifende und interdisziplinäre Zusammenarbeit sowie Kooperationen in einer gemeinsamen Koordinationsstruktur gefördert. Dazu wird auch das nationale HPC-Kompetenzzentrum, welches GCS im Rahmen von EuroHPC aufbaut, als primärer Ansprechpartner für Unternehmen beitragen.

HPC in der Medizin

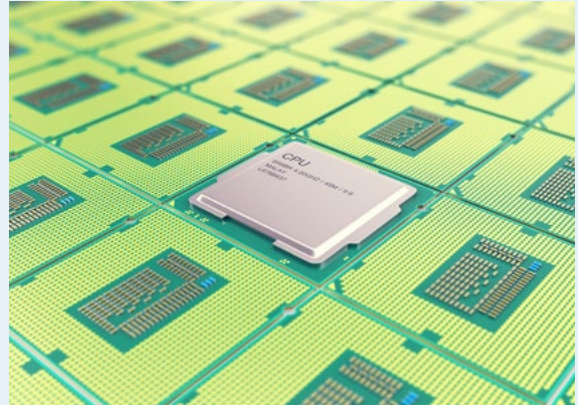
In Europa stellen Projekte wie „Exacalate4CoV“ Rechenleistung und Know-how zur Verfügung, um die Arzneimittelforschung bei der Suche nach möglichen Wirkstoffen gegen Covid-19 zu unterstützen. In dem Projekt wurden bereits über 50 mögliche Stoffe durch Computersimulationen identifiziert. Für einen dieser Kandidaten hat die klinische Testung begonnen, die bis hin zu einer möglichen Zulassung als Medikament führen kann.

In Deutschland stellt das GCS Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern einen gesonderten Zugang zu seinen Supercomputern für Forschung zu Covid-19 bereit. Die Forschungsprojekte reichen von Untersuchungen des Virus auf molekularer Ebene bis zur Modellierung der Ausbreitung der Pandemie und der Maßnahmen zur Eindämmung.

HPC-Methoden für verteilte Systeme

Moderne Prozessoren sind hochoptimierte mikroelektronische Komponenten und Teil nahezu jedes digitalen Systems. Ihre Geschwindigkeit ist weitgehend ausgereizt. Daher integrieren Hersteller immer mehr einzelne Prozessoren auf einem Chip, sogenannte Mehr-Kern-Prozessoren. In einem Supercomputer werden tausende dieser Mehrkern-Prozessoren vernetzt. Dies stellt die Softwareentwicklung vor neue Herausforderungen. Denn um die Leistungsfähigkeit ausnutzen zu können, müssen alle Prozessorkerne möglichst parallel ausgelastet werden. Die Verteilung der Rechenarbeit und der Daten auf viele Kerne produziert erheblichen zusätzlichen Aufwand. Die Architektur der Software muss von Grund auf darauf ausgelegt sein, ansonsten zehrt der Zusatzaufwand die mögliche Leistungssteigerung vollständig auf.

Diese sogenannte Skalierung von Betriebssystemen und Anwendungen ist eine zentrale Forschungs- und Entwicklungsfrage des High-Performance-Computings.



Die Lösungen für die Skalierung sind aber nicht nur für Supercomputer relevant, sondern auch für die sogenannten Verteilten Systeme. Diese aus vernetzten Komponenten bestehenden Systeme werden in der Telekommunikation, bei Cloudanwendungen und bei der Prozesskontrolle in der Industrie eingesetzt.

Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit ist auch bei der nachhaltigen Entwicklung und Pflege von Codes und Software sinnvoll. Die langjährig erfolgreiche Zusammenarbeit von HPC-Zentren mit Nutzungsgruppen bei der Softwareentwicklung sollte fortgeführt werden. Dazu sollen die relevanten Beteiligten gemeinsame Konzepte entwickeln.

Aus- und Weiterbildung abstimmen

Aus- und Weiterbildung für die Methodenkompetenz wird als gemeinsame Aufgabe von GCS, NHR, der Gauß-Allianz und weiteren Anbietenden wie zum Beispiel KI-Kompetenzzentren umgesetzt.

Das BMBF wird, gemeinsam mit den Ländern, mit dem Aufbau des NHR der zunehmenden Nachfrage nach Wissenschaftlichem Rechnen sowie den Anforderungen digitaler Wissenschaft begegnen. Mit dem NHR wird die Stärkung der Methodenkompetenz der Nutzenden sowie die Aus- und Weiterbildung im Wissenschaftlichen Rechnen an Hochschulen zukünftig dauerhaft und koordiniert gefördert. Für fachspezifi-

sche Bedarfe wird ergänzend mit den entsprechenden Fachdisziplinen zusammengearbeitet.

Die Aus- und Weiterbildungsangebote im GCS richten sich vor allem an fortgeschrittene Anwendende aller Fachdisziplinen. Ihr Schwerpunkt sind hardwarenahe Themen und das Co-Design von Hard- und Software.

Eine Koordinierung und Bündelung nationaler Aus- und Weiterbildungsaktivitäten soll über die Gauß-Allianz und den NHR-Verbund für den Hochschulbereich erfolgen. Die hohe Methodenkompetenz der HPC-Zentren soll durch die Anbindung an Hochschulen direkt in die Ausbildung einfließen.

Die deutsche Beteiligung an EuroHPC soll die Einbettung in europäische Aktivitäten sichern. Für Anwendende aus Deutschland sollen so auch Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten an europäischen Hoch- und Höchstleistungsrechenzentren erschlossen werden.

Wissens- und Technologietransfer in die Wirtschaft

Unternehmen, insbesondere KMU, die Anwendungsfälle für HPC bei sich sehen, müssen durch niedrigschwellige Angebote an den Einsatz von HPC-Technologien herangeführt werden. Dazu eignen sich fokussierte, gemeinsame Projekte mit Forschungspartnern, die auf realen Problemstellungen von Unternehmen aufsetzen und deren Anwendungskompetenz nachhaltig steigern. Aus dem Bedarf der Unternehmen heraus sollen industrielle Forschungs- und vorwettbewerbliche Entwicklungsvorhaben mit Anwendungsbezug gefördert werden, bei denen Wissens- und Technologietransfer einen Schwerpunkt bildet. Im Ergebnis sollen beispielhafte Lösungen durch den Einsatz von HPC-Methoden entstehen.

Sowohl die wissenschaftlichen Nutzenden der HPC-Ressourcen als auch die HPC-Anwendenden aus der Wirtschaft sind aufgrund der steigenden Komplexität auf die Unterstützung und Beratung durch HPC-Fachleute und deren Kompetenz angewiesen. Neben primär wissenschaftlich orientierten Angeboten sollten auch angepasste Aus- und Weiterbildungsangebote für Anwendende aus der Wirtschaft ausgebaut werden, um den Wissenstransfer in die Unternehmen zu beschleunigen.

Neue Nutzungsgruppen erschließen

Durch die Digitalisierung der Wissenschaft entstehen auch außerhalb der traditionellen HPC-Nutzungsgruppen neue Bedarfe. Neue wissenschaftliche Nutzungsgruppen sollen mit Best-Practice-Beispielen aus benachbarten Disziplinen sensibilisiert, zum Beispiel durch communityspezifische Infoveranstaltungen und Beratungen, und mit passenden Maßnahmen befähigt werden, HPC-Ressourcen zu nutzen. Die Befähigung umfasst angepasste Weiterbildungsmaßnahmen und interdisziplinäre Projekte zur Adaption von Anwendungen an Hoch- und Höchstleistungssysteme. Diese Maßnahmen sollen einerseits beim Studium selbst ansetzen und andererseits Maßnahmen für die Qualifizierung von Anwendenden aus der Wirtschaft umfassen. Die Bandbreite reicht von Spezialvorlesungen, Masterstudien-Programmen, Sommerschulen über Workshops und mehrteilige Schulungsprogramme bis hin zu Hackathons und Fachtagungen.

Kurz gesagt

Was wollen wir erreichen:

- Die interdisziplinäre Zusammenarbeit wird gefördert.
- Aus- und Weiterbildungsangebote sind abgestimmt.
- In der Wirtschaft sind Kompetenzen bedarfsgerecht aufgebaut.
- Neue Gruppen von Anwenderinnen und Anwendern nutzen HPC.

HPC-Anwendung in der Astrophysik

Zwischen den Galaxien ist das Universum nahezu leer und mit einem hauptsächlich aus Gas bestehenden intergalaktischen Medium gefüllt. Dieses Gas ist nicht gleichmäßig verteilt, sondern in ausgedehnten Filamenten konzentriert, welche als Kosmisches Netz bezeichnet werden. Astronomische Beobachtungen zeigen nur den heutigen Zustand. Wie sind diese Strukturen entstanden?

Mit Simulationen des intergalaktischen Mediums können die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Expansion des Universums untersucht werden. Eine solche Simulation muss eine sehr hohe räumliche Auflösung haben und gleichzeitig ein sehr großes Volumen abdecken. Dies gelingt nur auf den leistungsstärksten Supercomputern, unter anderem am Gauss Centre for



Supercomputing. Durch die Simulationen lassen sich die Eigenschaften der Dunklen Materie, ihre Auswirkungen auf die Bildung von Galaxien und die Struktur des Universums besser verstehen.



Wie wollen wir unseren Erfolg messen:

- Interdisziplinäre Anwendungen und Forschungsprojekte
- Nachnutzung und Pflege von Software
- Teilnehmende an Schulungsangeboten
- Anteil der Teilnehmenden aus der Industrie an den Schulungsangeboten
- Industrieanteil bei Anwendungen und Forschungsprojekten
- Anteil der neuen Nutzenden aus Wissenschaft und Industrie

6.6 Neue Technologien erforschen

Die Forschungs- und Technologieförderung sichert gemeinsam mit Beschaffung und Betrieb von HPC-Systemen die technologische Souveränität Deutschlands und Europas.

Grundlagen für Effizienzsteigerungen schaffen

Effizienz, Qualität und Zuverlässigkeit der Simulationen auf Hoch- und Höchstleistungsrechnern bei gleichzeitiger Reduktion des Energieverbrauchs hängen maßgeblich von der zugrundeliegenden Software ab. Notwendig ist daher eine intelligente HPC-Software, die den technischen Herausforderungen optimal begegnet und höhere Präzision, Visualisierungsqualität und Geschwindigkeit der Berechnungen erlaubt. Die zum Beispiel in den Bereichen Klimaschutz, Energie, Gesundheit oder Produktentwicklung benötigten

Modelle können so immer schneller und realitätsnäher simuliert werden. Eine wichtige Rolle spielen dabei die zugrundeliegenden Algorithmen und ihre Skalierung, das heißt ihre effiziente Ausführung auf einem Supercomputer mit tausenden von Prozessoren.

Auf der anderen Seite können Steigerungen der Energieeffizienz auch durch neue Hardwaretechnologien erreicht werden. Dies betrifft sowohl die Rechner selbst als auch die Rechnerinfrastruktur, zum Beispiel innovative Kühlsysteme oder neuartiges Systemmanagement. Innovationen zur Steigerung der Energieeffizienz sollen auch die Wettbewerbsfähigkeit kommerzieller Rechen- und Datenzentren in Deutschland und Europa verbessern und einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Zusätzlich soll die Nachnutzung von Supercomputern bzw. ihrer Komponenten nach Ablauf der Nutzungszeit in den HPC-Zentren in den Blick genommen werden.

Für die Erhöhung der Energieeffizienz von HPC-Systemen und den Aufbau klimafreundlicher Rechenzentren müssen prinzipiell zwei Entwicklungsstränge zusammengefasst und kombiniert werden: neue Hardware für energieeffiziente HPC-Systeme (zum Beispiel Kühl- und Energiesysteme, neue Rechenkomponenten und FPGA) und energieeffiziente Softwaretechnologien (beispielsweise Monitoring- und Steuerungssoftware, Optimierung der Simulationssoftware, Laufzeitumgebungen). Zur Lösung dieser Herausforderungen müssen die Fachleute verschiedener Disziplinen in einem Co-Design-Ansatz zusammenarbeiten. Diese Aktivitäten tragen insbesondere zur „Initiative Green ICT“ im Klimaschutzprogramm der Bundesregierung bei.

Mit geeigneten Fördermaßnahmen sollen Leistungssteigerungen mit hoher Breitenwirksamkeit für aktuelle und künftige Anwendungen aus Wissenschaft und Wirtschaft erzielt werden. Ergänzend können in der Förderrichtlinie KMU-innovativ neue Ideen für HPC-Hardware und -Software gefördert werden, die im Verbund von KMU und Wissenschaft weiterentwickelt werden. Dies trägt zur Stärkung des Mittelstandes und der deutschen System- und Komponentenanbieter bei.

Künftige Rechentechnologien entwickeln und nutzen

Die Heterogenität von HPC-Systemen, das heißt die Mischung aus Mehrkernprozessoren, Beschleunigern und FPGAs in unterschiedlichen Architekturen, wird weiter zunehmen. Künftig werden weitere Kompo-

ten wie neuromorphe Chips integriert und hybride Ansätze wie HPC-Quantencomputing-Systeme verfolgt. Um die Potenziale dieser heterogenen Systeme voll auszuschöpfen, müssen neue Algorithmen und Ansätze erforscht werden. Ein Schwerpunkt ist die Entwicklung von Algorithmen und Methoden für heterogene Rechnerarchitekturen (Co-Design-Ansatz).

HPC-Methoden ermöglichen gerade bei großen und sehr großen Datenmengen beispielsweise für Anwendungen der Künstlichen Intelligenz eine effiziente Verarbeitung. HPC-Expertinnen und Experten sollen gemeinsam mit Anwendenden innovative parallele Algorithmen und Methoden mit sehr guter Skalierbarkeit entwickeln.

Auch die Betriebssysteme und die systemnahen Schnittstellen für jede Anwendungssoftware müssen schlanker und schneller werden, um nicht zum limitierenden Faktor für die Anwendungsleistung zu werden. Im Hinblick auf Anwendungen der Künstlichen Intelligenz, die meist auf speziellen Systemen mit mehreren GPUs ausgeführt werden, und im Hinblick auf die Integration neuer Beyond-von-Neumann-Rechnertechnologien ergeben sich komplexe Heraus-

forderungen der Steuerung sowie der Ein- und Ausgabe für solche Systeme. Die Größe und Beherrschbarkeit moderner HPC-Systeme erfordert neue Methoden des Managements der Systeme zur Erhöhung der Fehlertoleranz und Robustheit von Anwendungen.

Um neuromorphe Technologien und Quantencomputing schnell in die Anwendung zu bringen, sollen sie an das bestehende HPC-Ökosystem angebunden werden. Ein erster Schritt ist die Integration eines Quantensimulators in einem Höchstleistungsrechenzentrum. Gleichzeitig müssen Schnittstellen und Steuerungsmöglichkeiten für die neue Hardware innerhalb des HPC- bzw. innerhalb des hybriden HPC-Quantencomputing-Systems geschaffen werden. Möglichkeiten dazu werden unter anderem durch das Konzept des modularen Supercomputings in Deutschland geschaffen.

Parallel hierzu orientieren sich die Beschaffungen neuer Rechner, sowohl bei GCS als auch im NHR-Programm, an den technologischen Entwicklungen und greifen dabei auch innovative und experimentelle Ansätze auf.

HPC für kleine und mittlere Unternehmen

Hochleistungsrechnen bietet auch kleinen und mittleren Unternehmen viele Möglichkeiten für neue Geschäftsmodelle und Innovationen. Zum Beispiel in einem Stuttgarter Unternehmen, das auf datenzentrierte IT spezialisiert ist und neue Ansätze für die virtuelle Validierung von Sensoren entwickelt. Gebraucht wird dies unter anderem für die Entwicklung des automatisierten Fahrens. Schon jetzt beanspruchen Test und Validierung einen immer größer werdenden Budgetanteil der Fahrzeugentwicklung. Bei autonom operierenden Fahrzeugen sind die Ansprüche aber noch wesentlich höher. Damit die sicherheitskritischen Fahrfunktionen zuverlässig funktionieren, müssen extrem viele Szenarien mit Einflüssen der Infrastruktur, des Verkehrs und des Wetters getestet werden. Dies ist mit konventionellen Methoden schwer zu bewältigen und sehr zeitaufwändig. Das KMU entwickelt in Kooperation unter anderem mit dem GCS-Standort Höchstleis-



tungsrechenzentrum Stuttgart ein Verfahren, in dem virtuell durch optimierte selbstlernende Verfahren und auf Supercomputern nach möglichen kritischen Fahrerereignissen gesucht wird. Aussagekräftige Testergebnisse kommen so nicht erst nach Monaten, sondern über Nacht.

Verzahnung mit Forschung und Innovation bei EuroHPC

Durch die gemeinsame Finanzierung von Forschungsprojekten durch EuroHPC und das BMBF ergeben sich für die forschenden Beteiligten in Deutschland erweiterte Möglichkeiten. Das BMBF vertritt Deutschland im Steuerungsgremium von EuroHPC und verankert die Ziele der nationalen HPC-Strategie auch in der strategischen Agenda. Auf diese Weise wird eine größtmögliche Synergie zwischen nationaler und europäischer FuE-Förderung erzielt.

In EuroHPC wird die „Europäische Prozessor Initiative“ (EPI) gefördert, die eine europäische Entwicklung von Prozessorchips der höchsten Leistungsklassen betreibt. Dieser Ansatz ist neben den Supercomputern perspektivisch auch für die europäische Wertschöpfung in Anwendungsfeldern wie dem autonomen Fahren oder dem Edge Computing relevant. Daher soll die Prozessorentwicklung zusätzlich durch das Mikroelektronik-Rahmenprogramm der Bundesregierung flankiert werden.

Kurz gesagt

Was wollen wir erreichen:

- Energieeffiziente Hard- und Software ist beim HPC im Einsatz.
- Heterogene HPC-Systeme auf Basis von Co-Design sind im produktiven Einsatz.

- Datengetriebene Anwendungen und KI-Anwendungen werden auf HPC-Systemen eingesetzt.
- Europäisches Design wettbewerbsfähiger Prozessoren für HPC und andere Anwendungen ist möglich.

Wie wollen wir unseren Erfolg messen:

- Zeitliche Entwicklung von Effizienzkennzahlen
- Messung des Gesamtenergieverbrauchs einer Simulation einschließlich der Einsparung durch neue Softwaretechnologien
- Verbesserung der Skalierbarkeit der Software
- Leistungsfähigkeit von Big-Data-Analysen
- Beteiligung an und Koordination von europäischen Verbundvorhaben
- Verfügbarkeit europäischer Prozessorprototypen



7 Evaluation

Aufgrund des hohen Innovations- und Entwicklungstempos im High-Performance-Computing und des Einsatzes in immer neuen Anwendungsfeldern ist es erforderlich, das Programm als lebendes Programm zu gestalten und die Maßnahmen kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Programmbegleitend erfolgt eine Auswertung des Ausbaus der Rechenkapazitäten und ihrer Nutzung sowie der Forschungsförderung. Hierbei wird berücksichtigt, dass viele Wirkungen von vorwettbewerblicher Forschung sich erst mittelfristig und indirekt entfalten. Dieses begleitende Monitoring stützt sich auf Statistiken der Supercomputingzentren, auf Förderdaten sowie auf Informationen, die über die Projektberichte erhoben werden und ermöglicht so eine zeitnahe Auswertung. Rollierend wird eine strategische Vorausschau auf prioritäre und neue Themen generiert, um geeignete Maßnahmen abzuleiten. Dies erreicht zum einen eine evidenzbasierte Justierung und legt zum anderen die Grundlagen für die Zwischenevaluierung des Programms.

Die geförderten Rechenzentren im Verbund des Nationalen Hochleistungsrechnens werden nach jeweils vier und nach acht Jahren durch den Strategiausschuss für das Nationale Hochleistungsrechnen evaluiert. Im siebten Jahr der Förderung erfolgt eine Systemevaluierung durch den Wissenschaftsrat.

Rechtzeitig zum Ende der Laufzeit dieses Programms soll auf Basis des begleitenden Monitorings über eine Verlängerung der Laufzeit bis 2027 entschieden werden.

Glossar

Beyond-von-Neumann: Die heute dominierende von-Neumann-Architektur (s. u.) stößt bei sehr umfangreichen Aufgabenstellungen an Leistungsgrenzen. Als Beyond-von-Neumann bezeichnet man daher alternative Computerarchitekturen, die keine klare Trennung zwischen Rechenwerk und Speicher vorsehen, um so effizienter und skalierbarer zu arbeiten.

Big Data: Unter Big Data werden sehr große und komplexe Datenmengen aus heterogenen Datenquellen verstanden, die mit hoher Geschwindigkeit, teilweise sogar in Echtzeit, generiert werden. Aufgrund ihrer teilweise sehr geringen Strukturierung können diese Daten weder manuell noch mittels klassischer Methoden der Datenverarbeitung effizient ausgewertet werden.

Cloud-Computing: Mittels Cloud-Computing werden IT-Dienstleistungen über ein Rechnernetz zur Verfügung gestellt, ohne dass diese auf lokalen Rechnern installiert sein müssen. Dies reicht von reiner Rechenleistung über die Bereitstellung von Speicherplatz und Datenbanken bis zur Ausführung von Software.

Co-Design: Moderne digitale Systeme bestehen aus Hard- und Softwarekomponenten und sind für spezielle Anwendungsszenarien entwickelt. Beim Co-Design werden Hard- und Software gemeinsam entwickelt und aufeinander angepasst, um das Gesamtsystem möglichst optimal zu gestalten.

CPU: Ein Zentralprozessor (Central Processing Unit), ist eine programmierbare elektronische Schaltung, die Daten verarbeitet und weitere Schaltungen steuern kann.

Digitaler Zwilling: Es handelt sich um ein digitales Abbild eines Objekts oder Prozesses aus der realen Welt. Digitale Zwillinge beschreiben sowohl Eigenschaften als auch das Verhalten des repräsentierten Objekts.

Edge-Computing: Beim Edge-Computing werden Daten vor Ort erfasst und direkt verarbeitet. Edge-Computing beinhaltet zahlreiche Technologien wie Sensornetze und mobile Datenerfassung.

Eingebettete Systeme: Ein eingebettetes System ist ein Computer mit meist kostengünstiger und ressourcenschonender Hardware und nur geringer Rechenleistung. Dieser Rechner übernimmt oft Überwachungs-,

Steuerungs- oder Regelfunktionen oder ist für die Daten- bzw. Signalverarbeitung zuständig.

European Open Science Cloud (EOSC): Die Europäische Open Science Cloud (EOSC) ist ein europäisches Projekt für eine vertrauenswürdige digitale Plattform für die Wissenschaft. Ziel der EOSC ist es, den europäischen Forscherinnen und Forschern Zugang zu Daten, Datenmanagement und Datenverarbeitung zu ermöglichen.

EuroHPC: EuroHPC ist eine öffentlich-private Partnerschaft von Europäischer Union und teilnehmenden Staaten mit Industrieverbänden. Die Form der Partnerschaft ist ein „Gemeinsames Unternehmen“, eine Einrichtung des Unionsrechts. Ziel von EuroHPC ist ein europäisches Ökosystem für das High-Performance-Computing.

European Processor Initiative (EPI): EPI ist eine Initiative mit dem Ziel, mit europäischen Technologien und Ressourcen leistungsstarke, effiziente Prozessoren für Supercomputer, Rechenzentren und autonome Fahrzeuge zu entwickeln.

Föderiert: Ein föderiertes Informationssystem erlaubt einen einheitlichen Zugriff auf einzelne, selbständige Systeme. Die Daten selbst werden dabei nicht vereinheitlicht und zentralisiert, sondern bleiben in den einzelnen Systemen.

FPGA: Bei einem feldprogrammierbaren Logikgatter (Field Programmable Gate Array) handelt es sich um einen integrierten Schaltkreis, dessen Rechenfunktion nicht festgelegt ist. Je nach Aufgabenstellung kann eine Schaltung auf einen FPGA „geladen“ werden. Diese Schaltung kann optimal auf die Aufgabenstellung angepasst werden. Sie ist daher deutlich energieeffizienter als zum Beispiel eine konventionelle CPU mit starrer Schaltung.

GAIA-X: GAIA-X ist ein von Deutschland und Frankreich initiiertes Projekt für eine vernetzte Datenstruktur für ein europäisches digitales Ökosystem. In diesem offenen und transparenten digitalen Ökosystem sollen Daten und Dienste verfügbar gemacht, zusammengeführt und vertrauensvoll geteilt werden können.

Gauß-Allianz: Die Gauß-Allianz ist ein gemeinnütziger Verein zur Förderung von Wissenschaft und Forschung und setzt sich vor allem aus den großen wissenschaftlichen Rechenzentren in Deutschland zusammen. Sie fördert den wissenschaftlichen Austausch zum High-Performance-Computing in Deutschland.

Gauss Centre for Supercomputing (GCS): Das GCS ist der Zusammenschluss der drei deutschen Höchstleistungsrechenzentren: dem Höchstleistungsrechenzentrum der Universität Stuttgart (HLRS), dem Jülich Supercomputing Centre (JSC) am Forschungszentrum Jülich und dem Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (LRZ) in Garching. Ziel des GCS ist die Förderung und Unterstützung des wissenschaftlichen Höchstleistungsrechnens. Das BMBF und die jeweiligen Landesministerien fördern gemeinsam die kontinuierliche Weiterentwicklung des GCS.

GÉANT: GÉANT ist ein paneuropäisches Netzwerk von aktuell 26 nationalen Forschungsnetzwerken. Das Netzwerk ist mit den Forschungsnetzen der USA und Japan verbunden.

Grafikprozessoren (GPU): Grafikprozessoren (Graphics Processing Unit, GPU) sind spezialisierte Prozessoren, die in sehr kurzer Zeit sehr viele Speicherzugriffe ermöglichen, um so effizient Computergrafiken zu berechnen. Aufgrund ihrer hochparallelen Struktur können GPUs große Datenblöcke wesentlich effizienter bearbeiten als herkömmliche CPUs (s.o.) und werden deshalb auch vermehrt in Hochleistungsrechnern als sogenannte Beschleuniger eingesetzt.

Graph-500: Diese Liste ist eine Alternative zur TOP500-Liste (s.u.). Sie nutzt einen Benchmark, der die Leistungsfähigkeit von Supercomputern bei datenintensiven Aufgaben bestimmt.

Green-500: Die Green-500-Liste sortiert die weltweit 500 leistungsstärksten Supercomputer nach ihrer Energieeffizienz.

Green ICT: Unter Green ICT wird das Bestreben verstanden, den gesamten Lebenszyklus von Informations- und Kommunikationstechnologie umwelt- und ressourcenschonend zu gestalten. Dies beinhaltet auch die Optimierung der Energieeffizienz.

High-Performance-Computing: Das Hoch- und Höchstleistungsrechnen (englisch: High-Performance-Computing) ist ein Überbegriff für sämtliche Rechenaufgaben, die sehr hohe Rechenleistung und Speicherkapazitäten benötigen.

High-Throughput-Computing (HTC): High-Throughput-Computing ist die Verwendung von Rechenleistung über lange Zeiträume, um sehr viele, aber wenig anspruchsvolle Rechenaufgaben zu erfüllen.

High Performance Data Analytics (HPDA): Die HPDA bildet die Konvergenz von Big Data und High-Performance-Computing. Sie stellt eine Analysetechnik dar, um mittels Supercomputing Muster und Strukturen in sehr großen Datenmengen zu erkennen. HPDA ist eine aufkommende Technologie im Kontext des Cloud-Computing und des Internet-der-Dinge.

HPCG-Liste: Diese Liste ist eine Alternative zur TOP500-Liste (s.u.). Im Gegensatz zur TOP500-Liste nutzt sie ein deutlich realistischeres Rechenszenario, um die Leistungsfähigkeit von Supercomputern zu messen.

HPL-AI: Der HPL-AI ist ein Benchmark zur Messung der Leistungsfähigkeit von Supercomputern, der die zunehmende Vereinigung von HPC mit Künstlicher Intelligenz berücksichtigt. Er ermöglicht es, moderne heterogene Supercomputer besser miteinander zu vergleichen.

InHPC: Mit dem Projekt InHPC wird die Vernetzung der drei GCS-Zentren ausgebaut und die Migration von Daten und zentrenübergreifende Arbeitsabläufe werden etabliert.

JARDS: Joint Application, Review, and Dispatch Service; eine vom Gauss Centre for Supercomputing (s.o.) eingesetzte Software, um Ressourcen wie Rechenzeit und Speicherkapazitäten zu vergeben.

KPI4DCE: KPI4DCE (Key Performance Indicators for Data Center Efficiency) ist eine Sammlung relevanter Kennzahlen für die Ressourceneffizienz und Umweltwirkung von Rechenzentren.

Machine Learning: Das Maschinelle Lernen ist ein Teilbereich der Künstlichen Intelligenz. Aus einem großen Satz an Trainingsdaten wird mithilfe des Maschinellen Lernens ein Modell ausgebaut. Damit können dann auch unbekannte Daten beurteilt werden. Das Maschinelle Lernen bedient sich dabei aus Methoden der Computerwissenschaften, Statistik, Psychologie, Neurowissenschaften, Wirtschaftswissenschaften und der Steuerungs- und Regelungstechnik.

Mehrkernprozessor: Bei einem Mehrkernprozessor werden mehrere Prozessorkerne auf einem einzigen Chip platziert. So kann die Leistung von Prozessoren deutlich gesteigert werden, auch wenn die Leistung einzelner Prozessorkerne technisch nahezu ausgereizt ist.

Memristor: Memristoren sind elektrische Bauteile, deren Widerstand („resistor“) abhängig vom Stromfluss ist. Gleichzeitig bleibt der Widerstandswert im Bauteil gespeichert („memory“). Integrierte Schaltungen mit Memristoren eignen sich besonders für neuronale Netze und Anwendungen Künstlicher Intelligenz.

Neuromorphe Chips: Sie sind ein Beispiel für eine Beyond-von-Neumann Architektur (s.o.). Ihr Aufbau ist an neuronale Verschaltungen im Gehirn angelehnt. Sie zeichnen sich gegenüber konventionellen Prozessoren u. a. durch ihre hohe Energieeffizienz aus.

Nationale Forschungsdateninfrastruktur (NFDI): In der Nationalen Forschungsdateninfrastruktur werden die Datenbestände von Wissenschaft und Forschung für das gesamte deutsche Wissenschaftssystem systematisch erschlossen, vernetzt und nachhaltig sowie qualitativ nutzbar gemacht. Die NFDI wird vom BMBF und den Ländern gemeinsam gefördert.

Nationales Hochleistungsrechnen (NHR): Das Nationale Hochleistungsrechnen ist ein im Aufbau befindlicher, koordinierter Verbund deutscher Hochleistungsrechenzentren, der gemeinsam vom BMBF und den Ländern gefördert wird.

PetaFLOPS: PetaFLOPS bezeichnet die Rechenleistung von einer Billion (1.015) einzelner Rechenoperationen („floating point operation“, FLOP) pro Sekunde.

Power Usage Effectiveness (PUE): PUE beschreibt einen Aspekt der Energieeffizienz eines Rechenzentrums. Der PUE-Wert ist das Verhältnis der gesamten Energiemenge, die ein Rechenzentrum benötigt, zu der Energiemenge, die nur dessen IT-Infrastruktur verbraucht.

Quantencomputer: Quantencomputer nutzen „Quantum Bits“ (Qubits), die untereinander nach speziellen Gesetzmäßigkeiten der Quantenmechanik verbunden sind und damit einen wesentlich komplexeren Gesamtzustand als die Bits in einem klassischen Computer annehmen können. Quantencomputer haben das Potenzial, spezielle Probleme wie Suchen in riesigen Datenmengen oder Optimierungen deutlich effizienter zu lösen als ein klassischer Computer.

Smart-Scaling-Strategie: Die Smart-Scaling-Strategie ist die Strategie des Gauss Centre for Supercomputing (s.o.) für die Weiterentwicklung und den Ausbau des Höchstleistungsrechnens in Deutschland.

Supercomputer: Ein Supercomputer ist ein besonders leistungsstarker Computer, der typischerweise aus einer großen Anzahl Mehrkernprozessoren (s.o.) besteht, die extrem schnell miteinander vernetzt sind.

TOP500-Liste: Dies ist die bekannteste Rangliste der Supercomputer weltweit. Die Leistungsfähigkeit eines Computersystems wird dabei mittels eines Benchmarks zur Lösung linearer Gleichungssysteme (LINPACK) ermittelt. Dieser Benchmark basiert auf nur einem Rechenszenario ohne engen Bezug zu realen Anwendungen.

Von-Neumann-Architektur: Die von-Neumann-Architektur ist ein Schaltungskonzept zur Realisierung universeller Rechner und bildet die Grundlage aller modernen Computer. Ein von-Neumann-Rechner besteht aus den vier Komponenten Rechenwerk, Steuerwerk, Bus-System und Eingabe-Ausgabe-Einheit.

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Elektronik und Autonomes Fahren; Supercomputing
53170 Bonn

Bestellungen

schriftlich an
Publikationsversand der Bundesregierung
Postfach 48 10 09
18132 Rostock
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de
Internet: bmbf.de
oder per
Tel.: 030 18 272 272 1
Fax: 030 18 10 272 272 1

Stand

April 2021

Text

BMBF / PT-DLR

Gestaltung

VDI/VDE-IT, Berlin

Druck

BMBF

Bildnachweise

Titel: Hessen schafft Wissen - Thomas Ernsting
Vorwort: BMBF / Laurence Chaperon
Seite 2: I'm Thongchai / AdobeStock
Seite 4: ipopba / AdobeStock
Seite 6: Forschungszentrum Jülich / Wilhelm-Peter Schneider
Seite 9: TommL / Getty Images
Seite 10: Yentafern / Shutterstock
Seite 11: Wilfried Wirth / Getty Images
Seite 12: HERRNDORFF_images / AdobeStock
Seite 14: Gorodenkoff / AdobeStock
Seite 14: Alessandro Podo, LRZ
Seite 15: Erika Fischer für HLRS
Seite 16: Anna ART / AdobeStock
Seite 17: Boris Jordan Photography / Getty Images
Seite 18: vchalup / AdobeStock
Seite 20: GÉANT
Seite 21: Gorodenkoff / AdobeStock
Seite 23: Rost-9D / Getty Images
Seite 24: ktsdesign / AdobeStock
Seite 25: REDPIXEL / AdobeStock
Seite 26: ika – RWTH Aachen University
Seite 28: Mykhailo / AdobeStock

Diese Publikation wird als Fachinformation des Bundesministeriums für Bildung und Forschung kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

