

bild der wissenschaft **extra**



Digitale Zwillinge



Liebe Leserinnen und Leser,

rund 15 Jahre ist es her, als ich zum ersten Mal am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart zu Gast war – und tief beeindruckt davon, was ich dort zu sehen bekam. Es ging um eine Sonderbeilage für bild der wissenschaft zur Forschung am HLRS.

Die Auswahl an Projektbeispielen war imposant – von der Simulation der Verbrennung in Kraftwerken über virtuelle Testfahrten in neuen Automodellen bis hin zur Analyse innerstädtischer Luftströmungen.

Nun habe ich das Zentrum erneut besucht – für ein weiteres

Sonderheft zum Höchstleistungsrechnen. Dabei konnte ich bestaunen, wie immens sich das Supercomputing und sein Anwendungspotenzial in Forschung und Entwicklung während der letzten Jahre weiterentwickelt haben. Zudem zeigte mir der Besuch, wie diese Technologie inzwischen auch bei der Bewältigung gesellschaftlicher und medizinischer Herausforderungen, etwa einer Pandemie, sowie bei Umwelt- und Klimaschutz hilft. Die Forscher am HLRS sind auf diesem Gebiet Vorreiter.

Zentrales Element bei vielen Anwendungen des Supercomputings sind heute „digitale Zwillinge“: detaillierte virtuelle Abbilder von realen Objekten wie Autos, Theaterbühnen oder ganzen Städten. Was

das bedeutet und was damit möglich ist, erfahren Sie in den Beiträgen dieses Hefts – unter anderem im Interview mit Michael Resch ab Seite 10. Wie schon vor 15 Jahren hat er mich auch diesmal als Direktor des HLRS empfangen – und mir mit seiner Gabe, selbst hochkomplexe Zusammenhänge exzellent erklären zu können, wieder sehr imponiert. Vielleicht geht es Ihnen genauso? Ich wünsche Ihnen jedenfalls eine spannende Lektüre.

Hertlich, Ihr Ralf Butts

bild der wissenschaft-Redakteur für Technologie



Dr. Thomas Brandstetter ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in der Nähe von Linz in Oberösterreich. Er hat sich unter anderem auf Computertemen spezialisiert.



Der Physiker und Technikjournalist Michael Vogel aus Bietigheim-Bissingen berichtet für bild der wissenschaft regelmäßig über aktuelle Trends in der Informationstechnologie.



Inhalt

4 Der Porsche im Supercomputer

Mit seinen Systemen unterstützt das HLRS unter anderem die Wirtschaft. Immer mehr Firmen sind auf so massive Rechenkapazitäten angewiesen.

9 Besser gerüstet für Medizin und Krisen

In zwei neuen Projekten der Stuttgarter Forscher geht es um Supercomputing für Kriseneinsätze und zur Unterstützung der Medizintechnik.

10 „Wie wir die Realität nachbauen und auf Menschen zugehen“

Das HLRS ragt heraus unter den Höchstleistungsrechenzentren. Direktor Michael Resch erläutert die Stärken der Forschungseinrichtung.

14 Stadtplanung als Gesamtschau

Ein digitaler Zwilling hebt die Stadtplanung auf ein neues Niveau. Davon profitieren Politik, Verwaltung und Zivilgesellschaft.

20 Vertrauensfrage für Algorithmen

Die Digitalisierung wirft nicht nur technische, sondern auch ethische Fragen auf. Ein Team am HLRS forscht an nützlichen Empfehlungen.

22 „Wir wollen führend sein im europäischen Supercomputing“

Die EU-Organisation EuroHPC JU hat sich zum Ziel gesetzt, die Top-Position Europas im Hochleistungsrechnen wiederherzustellen. Direktor Anders Jensen erklärt, wie dies gelingen soll.

24 Wenn Roboter schneller lernen

Um die Algorithmen seiner Robotersteuerungen effizient trainieren zu können, setzt das Familienunternehmen Festo auf die Systeme des HLRS.

26 Digitale Zwillinge in der Kultur

Die Expertise für Visualisierung und virtuelle Realität will das Media Solution Center Baden-Württemberg für Kunst- und Kulturschaffende nutzbar machen.

30 Nachdrücklich nachhaltig

Höchstleistungsrechnen kann helfen, nachhaltigere Technologien zu entwickeln. Überdies lässt sich durch eine bessere Effizienz der Supercomputer ein Beitrag zum Klimaschutz leisten.

35 Impressum, Bildnachweise, Online-Umfrage

Der Porsche im Supercomputer

Mit seinen Systemen unterstützt das Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) in erster Linie die Wissenschaft – aber auch die Wirtschaft. Unternehmen werden künftig wohl häufiger auf so massive Rechenkapazitäten angewiesen sein.

von MICHAEL VOGEL

Wer mit dem Auto durch starken Regen, die Waschanlage oder eine tiefe Pfütze fährt, für den ist es eine Selbstverständlichkeit: Im Fahrzeug bleibt es schön trocken. Allerdings: Damit das so selbstverständlich ist, haben die Hersteller bei der Entwicklung eines Fahrzeugmodells einen großen Aufwand betrieben. Dichtungen an Türen und Fenstern müssen entsprechend ausgelegt sein. Abdeckungen am Unterboden und Motorraum müssen so gestaltet und befestigt sein, dass sie sich nicht verformen oder lösen. Und dann gibt es da noch die Klimaanlage, die zwangsläufig Lufteinlässe braucht. Auch

diese Öffnungen gilt es so zu gestalten, dass kein Wasser eindringen kann. Die Fahrzeughersteller fassen all diese Anforderungen unter dem Begriff „Wassermanagement“ zusammen.

„Das Wassermanagement war lange Zeit stark auf reale Tests angewiesen“, berichtet Monika Wierse. „Das änderte sich bei uns erst in den letzten Jahren dank geeigneter Simulationen.“ Die Mathematikerin leitet bei Porsche den Bereich Methoden & Model-based System Engineering. In dieser Funktion ist sie maßgeblich daran beteiligt, dass sich Fragestellungen wie beim Wassermanagement bereits mittels Computer an digitalen Modellen bearbeiten lassen – ohne dass ein echter Tropfen Regen fällt.

Detailtreues Abbild des Wagens

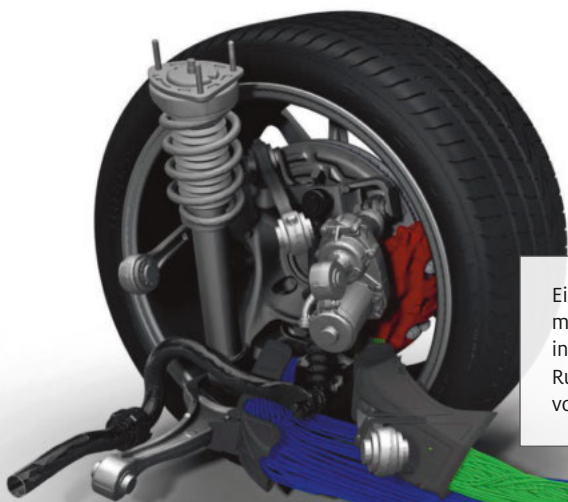
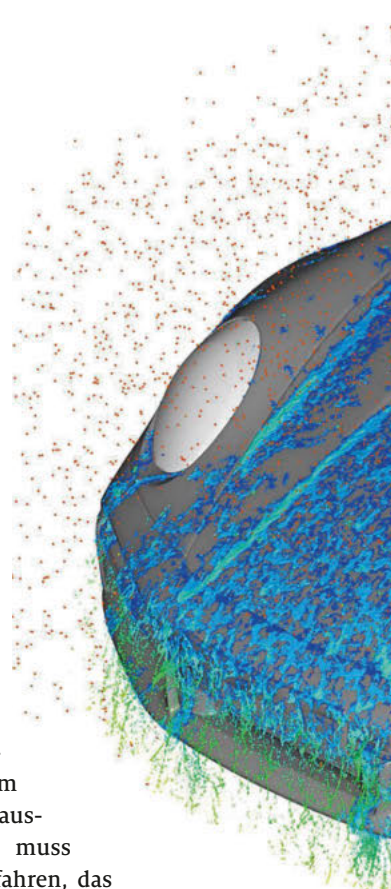
Das Modell im Rechner stellt dazu ein detailgetreues Abbild des realen Fahrzeugs dar. Nur im Innenraum kann man sich einiges

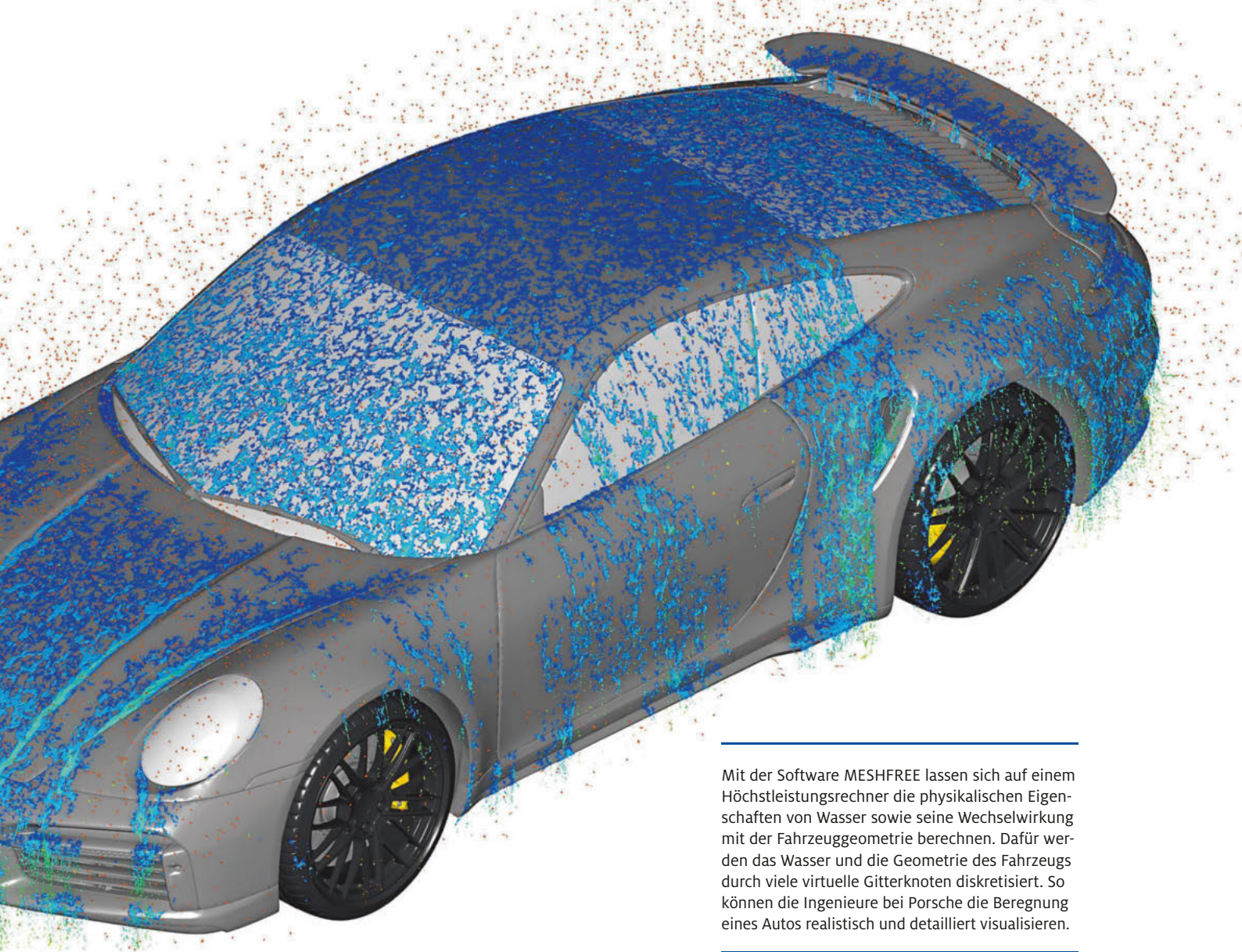
Eine aerodynamisch optimierte Bremsenbelüftung in zwei Strömen steigert die Rundstrecken-Performance von Porsche-Fahrzeugen.

sparen, zum Beispiel die Sitze. In den Simulationen wird das Modell dann virtuell beriebelt oder einem starken Regen ausgesetzt. Es muss durch Wasser fahren, das bis zu einem halben Meter tief ist. Es fährt schnell durch den Regen, um zu sehen, wie sich die auftreffenden Wassertropfen entlang der Karosserie nach hinten bewegen. All das ist nur ein Teil der wasserbezogenen Fragestellungen, die die Engineering-Teams bei Porsche mit Simulationen bearbeiten.

Selbst die Vorlackierung in der Produktion, bei der die Karosserien komplett durch riesige Tauchbäder geführt werden, lässt sich simulieren. Denn die Schutzschichten, die es dabei auf die Karosserie aufzutragen gilt, liegen als wässrige Lösung vor. Nur die Absicht ist eine andere. Während Regenwasser später nicht ins Fahrzeug eindringen soll, ist es in den Tauchbädern genau umgekehrt: Da soll die Beschichtung selbst in die letzten Winkel der Karosserie gelangen.

„Das Wassermanagement ist so rechenintensiv, dass Porsche es nicht auf den eigenen Systemen simulieren kann“, stellt Wierse fest. Es wäre schlichtweg





Mit der Software MESHFREE lassen sich auf einem Höchstleistungsrechner die physikalischen Eigenschaften von Wasser sowie seine Wechselwirkung mit der Fahrzeuggeometrie berechnen. Dafür werden das Wasser und die Geometrie des Fahrzeugs durch viele virtuelle Gitterknoten diskretisiert. So können die Ingenieure bei Porsche die Beregnung eines Autos realistisch und detailliert visualisieren.

unwirtschaftlich für das Unternehmen, so gewaltige Rechenkapazitäten vorzuhalten. „Vielmehr greifen wir dafür auf die Systeme des HLRS zu“, sagt die Porsche-Bereichsleiterin. Der Stuttgarter Automobilbauer gehört zu den Unternehmen der ersten Stunde, die am HLRS bereits seit Mitte der 1990er-Jahre Simulationen rechnen lassen. Insgesamt stehen industrielle Nutzer für rund zehn Prozent der Rechenauslastung am HLRS. Waren es 2017 noch 25 Unternehmen im Jahr, so stieg die Zahl bis 2021 auf 61.

Vorteile für alle Beteiligten

Nicht nur die Unternehmen, sondern auch das HLRS profitiert von diesen Kooperationen zwischen der akademischen und der industriellen Welt. Denn es kann so seine Expertise im Bereich

des Höchstleistungsrechnens weiterentwickeln, um dieses auf rechnergesteuerte Ingenieurprobleme der realen Welt anzuwenden.

Die Automobilindustrie gehört zum maßgeblichen Nutzerkreis des HLRS. Prototypen sind bei der Entwicklung eines neuen Fahrzeugmodells ein probates Mittel, um sich frühzeitig ein möglichst realistisches Bild zu machen. Früher war es unvermeidlich, zahlreiche physische Prototypen eines neuen Fahrzeugs zu bauen, bevor die Produktion anlief. Doch so ein Prototyp lässt sich erst bauen, wenn seine Einzelkomponenten bereits weitreichend spezifiziert sind und ebenfalls prototypisch vorliegen. Deshalb sind physische Prototypen immer erst spät verfügbar. Das ist teuer und langwierig. Treten dann noch grundlegende

Probleme auf, macht das die Sache noch wesentlich aufwendiger.

„Wir haben im Unternehmen die strategische Vorgabe, mit möglichst wenigen physischen Prototypen zu entwickeln“, sagt Monika Wierse. „Als wir vor einigen Jahren unser erstes rein elektrisch angetriebenes Modell entwickelt haben, den Taycan, war dieser schon zigital virtuell über die Nordschleife des Nürburgrings gefahren, bevor es einen realen Prototyp gab.“ So ließ sich zum Beispiel sehr früh beurteilen, wie der Kühlkreislauf für Hochvoltbatterie und Elektromotoren ausgelegt sein musste, um sämtlichen Fahranforderungen gerecht zu werden – auch extremen. Mit Simulationen lässt sich selbst für einander widersprechende Anforderungen die bestmögliche Lösung finden.

Aerodynamik, Akustik und Crash

Für einfachere Simulationen verfügt die Automobilbranche über eigene leistungsfähige Rechner. Doch eine Reihe von Aufgaben lässt sich nur mit Supercomputern bearbeiten, wie sie am HLRS stehen. Dazu gehören neben dem Wassermanagement auch Simulationen in den Bereichen Aerodynamik, Aeroakustik und Crash. Die Aerodynamik hat bekanntlich maßgeblichen Einfluss auf den Verbrauch, aber auch auf das Fahrverhalten und den Fahrkomfort. Bei der Aeroakustik geht es beispielsweise um die Frage, wie sich die Luftströmung bei geöffnetem Schiebedach im Innenraum des Fahrzeugs verändert. Und virtuelle Crashtests sind natürlich viel billiger als reale. „Bei solchen virtuellen Crashtests erreichen wir inzwischen eine Auflösung im Millimeterbereich und können damit zum Beispiel beurteilen, ob eine Klebnaht aufreißt oder ein Schweißpunkt hält“, verdeutlicht Wierse die heutigen Möglichkeiten.

Für die Simulationen am HLRS ist zunächst ein virtuelles Modell eines Fahrzeugs nötig. Die Supercomputer funktionieren anders als ein gewöhnlicher PC oder ein typischer Rechnerverbund, wie er bei den Fahrzeugherstellern steht. Su-

percomputer arbeiten nicht sequenziell, sondern hochgradig parallel. So lassen sich viele Berechnungen gleichzeitig oder große Berechnungen durch Zerlegen in viele Bereiche schneller ausführen. Dafür ist ein Supercomputer mit Hunderttausenden von Prozessorkernen ausgestattet. Auch wenn der Vergleich etwas hinkt: Der Prozessor eines Smartphones oder PCs hat nur eine niedrige ein- bis zweistellige Zahl von Prozessorkernen.

Maschinen mit Hunderttausenden von Prozessorkernen

Das virtuelle Modell muss daher für die Simulationen am HLRS in sinnvolle einzelne Bereiche zerlegt werden – und zwar so, dass diese Bereiche untereinander physikalisch relevante Größen austauschen: Größen wie Temperaturen, Kräfte, Verformungs- oder Schwingungseigenschaften. „Dieses Zerlegen des Modells ist notwendig, damit die Berechnungen möglichst effizient parallel ablaufen“, so Wierse.

Die Außenhülle besteht in einem solchen Modell aus einer großen Zahl von zweidimensionalen Flächen, die sich an die dreidimensionale Fahrzeugkontur anschmiegen. Typisch ist dafür eine Zahl in der Größenordnung von weit mehr als zehn Millionen Flächen. In das Modell fließen zudem die Daten der verwendeten Materialien ein. Bei diesen Daten handelt es sich sowohl um Materialeigenschaften wie Dichte oder Zugfestigkeit als auch um experimentell ermittelte Werte, zum Beispiel das Schwingungsverhalten einer bestimmten Baugruppe.

Perfekt angepasste Algorithmen

Es ist gar nicht so einfach, einem Supercomputer immer genau so viele Rechenaufgaben gleichzeitig parallel zu geben, dass der Gesamtverbund schneller Ergebnisse liefert, als mit konventioneller Technik möglich wäre. Die Voraussetzung dafür ist, dass die Algorithmen der Simulation perfekt auf dieses Rechenparadigma angepasst sind.

Sind all diese Vorarbeiten erfolgreich abgeschlossen, ist der Start der eigentlichen Berechnung ziemlich unspektakulär. Niemand von Porsche muss dazu vor Ort im HLRS sein. Vielmehr lässt sich die Berechnung per Mausklick von quasi je-



Virtuelle Crashtests bieten inzwischen eine Auflösung von Millimetern. So lässt sich etwa beurteilen, ob eine Klebnaht reißt oder ein Schweißpunkt hält.

dem Rechner in der Entwicklungsabteilung des Fahrzeugherstellers starten. Nach Abschluss der Berechnung landen die Ergebnisse wieder auf dem Rechner in der Porsche-Entwicklungsabteilung. „Wir haben das nie so genannt, aber im IT-Alltag bezeichnet man das heute als Cloud Computing“, sagt Wierse. „Wir haben eine direkte und sichere Anbindung, der Datentransfer ist weitgehend automatisiert.“

5 Sekunden Regen, 2 Tage rechnen

Wie aufwendig solche Berechnungen am HLRS sind, verdeutlichen auch ein paar Zahlen, die für Simulationen im Rahmen von Porsches Wassermanagement charakteristisch sind. Die Simulation von starkem Regen für das komplette Fahrzeug erfolgte auf 256 Prozessorkernen. Es regnete in der Simulation nur für gut fünf Sekunden, trotzdem rechnete der Supercomputer dafür 53 Stunden lang. Das virtuelle Durchfahren einer 15 Zentimeter tiefen Wasserfläche mit einer Geschwindigkeit von 30 Kilometern pro Stunde erfolgte virtuell innerhalb von zwei Sekunden. 512 Prozessorkernen waren damit 105 Stunden beschäftigt.

Solche Zahlen, so ein Aufwand – das alles kann auch abschrecken. HLRS-Geschäftsführer Bastian Koller sagt: „Unternehmen, die erstmals mit dem Thema Höchstleistungsrechnen in Berührung kommen, fragen sich dann, ob sie die Ressourcen dafür haben, was das alles kostet, ob ihre Daten sicher sind und wie gut die Betreuung ist.“

Viele dieser Sorgen kann der Ingenieur entkräften. „Wenn unser Expertenteam mit einem interessierten Unternehmen ein Erstgespräch über die konkreten Möglichkeiten führt, dann hat es keinen Vertragsabschluss im Kopf.“ Vielmehr gehe es darum, das Problem möglichst so einzugrenzen, dass deutlich werde, welchen Beitrag das HLRS zur Lösung bieten könne. Das reicht bis hin zu der Frage, ob sich die möglicherweise bislang bereits genutzten Simulationsalgorithmen für die Supercomputer parallelisieren lassen. „Es gibt generell auch keine Mindestabnahmemengen an Rechenkapazität“, sagt Koller. „Abgerechnet wird nur das, was tatsächlich genutzt wurde.“



HLRS-Geschäftsführer Bastian Koller ist sich sicher, dass künftig immer mehr Firmen einen wettbewerblichen Nutzen aus der Integration von Supercomputing-Technologien ziehen werden.

Beratung für Unternehmen

Um auch für den Mittelstand die Anfangshürden des Supercomputing zu senken, hat die Universität Stuttgart, zu der das HLRS organisatorisch gehört, gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) 2010 die SICOS BW gegründet. Das Unternehmen informiert bei einschlägigen Branchenveranstaltungen über das Höchstleistungsrechnen. Es berät mittelständische Unternehmen auch bei Förderprogrammen oder bringt die Protagonisten in Partnernetzwerken zusammen. So endet im Sommer 2023 das auf drei Jahre angelegte EU-geförderte Projekt „FF4EuroHPC“, an dem mehrere europäische Supercomputing-Zentren beteiligt sind. Koordiniert wird es vom HLRS. Folgeprojekte

sind nicht ausgeschlossen. „In diesem Rahmen konnten mittelständische Unternehmen eine Förderung für ein einjähriges Business-Experiment beantragen, das sie dann zum Beispiel mit dem HLRS durchführten“, berichtet Koller. „Das ist sozusagen zum Reinschmecken in die Thematik.“

Das HLRS bietet zudem über das klassische Trainingsprogramm hinaus berufsbegleitende Weiterbildungen an, die sogenannte Supercomputing-Akademie. Zudem gibt es Solution Center unter dem Dach des HLRS: für die Automobilbranche, die Kreativwirtschaft und nun für die Medizintechnik. „In diesen Solution Centern wollen wir alle Beteiligten branchenspezifisch zusammenbringen – Anwenderunternehmen, die Forschung,





Das HLRS bietet für Teilnehmer aus der Wirtschaft Trainings und berufsbegleitende Weiterbildungen an, zum Beispiel in der „Supercomputing-Akademie“.

Technologie- und Softwareanbieter“, sagt Koller. „Schließlich stehen alle Anwenderunternehmen vor ähnlichen Herausforderungen.“

Am längsten, nämlich seit 2010, existiert das Automotive Solution Center, das sich auf fünf Themenbereiche konzentriert: Fahrzeugantrieb, Fahrzeugstruktur, Fahrzeugphysik, Fahrzeugautomatisierung und -konnektivität sowie Numerik und Digitalisierung. „Über dieses Netzwerk kam es auch schon zur vorwettbewerblichen Zusammenarbeit in Projekten“, sagt Koller. Auch Industriepromotionen gibt es immer wieder. Knapp 50 Mitglieder gehören dem Solution Center an, darunter auch die Automobilhersteller Audi, BMW und Porsche.

Immer mehr Nutzer

Die Spanne der Unternehmen und Branchen, die bereits auf die HLRS-Systeme gesetzt haben, wächst. Da ist zum Beispiel der Luft- und Antriebstechnikspezialist, der unter anderem Ventilatoren für die Klimatechnik fertigt. Irgendwann reichten die eigenen Rechnerkapazitäten

bei der Entwicklung nicht mehr aus, weil die Simulationen mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung erfolgen mussten. Nur so lassen sich Druckschwankungen und Turbulenzen identifizieren, die das menschliche Ohr als Lärm wahrnimmt. Mit den HLRS-Systemen war das kein Problem.

Auch ein Ingenieurbüro, das im Bereich des Brandschutzes tätig ist, nutzt bereits die Stuttgarter Rechnerkapazitäten. Sonderbauten wie Einkaufszentren lassen sich oft nicht so einfach mit den bauordnungsrechtlichen Vorschriften in Einklang bringen. Die alternative Bewertung des zu erwartenden Sicherheitsniveaus erfolgt dann durch Brandsimulationen, wobei man dazu die gesamte Dauer eines Brandes in sehr kleinen Zeitintervallen berechnen muss. Mit den eigenen Mitteln hätte das Ingenieurbüro für diese Simulation mehrere Wochen benötigt.

Auch der Aufzughersteller TK Elevator hat die Rechnerkapazität des HLRS schon genutzt: für die Entwicklung eines völlig neuen Aufzugskonzeptes. Dazu simulierte

das Unternehmen am HLRS maßgebliche Funktionen, um sich ein genaues Bild von Fahrgeräuschen und Vibrationen machen zu können. Das HLRS-Team ermöglichte zudem eine Virtual-Reality-Visualisierung des Aufzugs.

Weit mehr als nur Simulation

HLRS-Geschäftsführer Koller ist sich sicher, dass künftig noch sehr viel mehr Unternehmen auf Höchstleistungsrechner angewiesen sein werden. „Lange Zeit war Höchstleistungsrechnen gleichzusetzen mit Simulationen“, sagt Koller. „Das ändert sich aber seit einigen Jahren.“ Denn die Analyse von umfangreichen Daten – Stichwort: Big Data – und die Nutzung von Algorithmen mit Künstlicher Intelligenz können ebenfalls sehr rechenintensive Aufgaben zur Folge haben, zu denen Supercomputer ihren Beitrag leisten können. Das Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart hat darauf bereits reagiert und seine Systeme technisch entsprechend aufgerüstet – gerade auch für Unternehmen, die sich diese Themen nun erschließen. ■

Besser gerüstet für Medizin und Krisen

Das HLRS hat über die Jahre immer wieder fachliches Neuland betreten. Derzeit geschieht das in zwei weiteren Projekten, die sehr unterschiedlich sind: Es geht um Supercomputer für Kriseneinsätze und zur Unterstützung der Medizintechnik.

von Michael Vogel

Wenn in der Corona-Pandemie die Auslastung von Intensivstationen prognostiziert wurde, waren dabei auch Simulationen des HLRS im Spiel. „Diese Arbeit zeigte, dass es viel mehr Potenzial für das Höchstleistungsrechnen in Krisen- und Notfallsituationen gibt, nicht nur in der nächsten Pandemie, sondern etwa auch bei Umweltkatastrophen“, sagt HLRS-Forscher Ralf Schneider. Doch dazu ist Vorarbeit nötig: Das Projekt CIRCE war geboren, dessen technischer Projektleiter Schneider ist. CIRCE steht für Computational Immediate Response Center for Emergencies. Nach Abschluss des Projekts soll klar sein, was ein operatives Zentrum technisch und organisatorisch bräuchte und leisten könnte, um öffentliche Einrichtungen in Krisenzeiten schnell und unbürokratisch zu unterstützen.

Beim Ermitteln des Bedarfs durch das HLRS-Team im Gespräch mit Experten in Behörden und Ministerien entstanden bereits viele Ideen, was sich per Simulation klären ließe. „Aber oft existieren keine Modelle“, sagt Schneider. „Dabei sind sie die Voraussetzung, um zu beurteilen, ob Höchstleistungsrechner sinnvoll einsetzbar wären.“ Daher konzentriert sich das HLRS auf Fälle, in denen es

Modelle gibt. Zum Beispiel die Analyse eines extremen Rheinhochwassers: Welche Folgen hätte ein Deichbruch? „Mit Simulationen lässt sich zeitnah klären, wo evakuiert werden muss und wo sich Rettungsfahrzeuge und -stationen sicher positionieren lassen“, sagt Schneider.

Beim zweiten Projekt geht es um die Frage, wie die Medizintechnik von Supercomputern profitieren kann. „Das ist bei Produktentwicklung, Qualitäts- oder Zulassungsprozessen der Fall“, sagt Andreas Wierse, Geschäftsführer der SICOS BW. Gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) hat das HLRS dieses Unternehmen 2010 gegründet, um kleinen und mittleren Firmen den Zugang zu Simulationstechniken zu erleichtern. „Die deutsche Medizintechnik ist stark mittelständisch geprägt und innovativ“, sagt Wierse. Simulationen böten da neue

Möglichkeiten. So lässt sich damit das Potenzial neuer Materialien und Komponenten für Instrumente oder Implantate prüfen. Daher hat SICOS BW das Solution Center CASE4Med (Computer Aided Solution Engineering for Medical) gegründet. Daran beteiligt sind das HLRS sowie das Innovations- und Forschungs-Centrum Tuttlingen der Hochschule Furtwangen. Der Raum Tuttlingen gilt als Hochburg der Medizintechnik.

Das Projekt wird finanziert durch das baden-württembergische Wissenschaftsministerium. Es soll eine Community entstehen, angezogen von ersten Fallbeispielen. Eine Vereinsgründung schafft die organisatorische Basis. „Das Interesse ist groß“, sagt Wierse. „Im Rahmen von CASE4Med werden der Informationsaustausch institutionalisiert und eine wettbewerbsfähige Forschung möglich.“ ■



Neue Möglichkeiten für die Medizintechnik: Forscher simulieren die Luftströme am Operationstisch.



„Wie wir die Realität nachbauen und auf Menschen zugehen“

Das HLRS ragt heraus unter den Höchstleistungsrechenzentren. Direktor Michael Resch erläutert die Stärken der Forschungseinrichtung – und die Herausforderungen beim Supercomputing

Das Gespräch führte RALF BUTSCHER

Prof. Dr. Michael Resch

ist seit 2003 Direktor des Höchstleistungsrechenzentrums Stuttgart (HLRS) und des Instituts für Höchstleistungsrechnen der Universität Stuttgart. Er initiierte den Ausbau des HLRS zu einem Anbieter von Ressourcen, Lösungen und Services. Er verantwortet viele Initiativen, um Supercomputing für Forschung, Entwicklung und zur Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen zugänglicher zu machen. Der Mathematiker engagiert sich in vielen Organisationen und wurde dafür oft ausgezeichnet. Er beschäftigt sich mit Programmiermodellen für paralleles Rechnen und numerischer Simulation sowie mit der Anwendung von Simulationen, auch in Natur und Kultur.

Herr Professor Resch, was hat man sich unter einem digitalen Zwilling vorzustellen?

Der Begriff bedeutet, dass man in der digitalen Welt einen Zwilling von etwas Realem schafft. Daran lassen sich virtuell auch Dinge ausprobieren, die an einem realen Objekt sehr aufwendig wären.

Für wen bietet ein digitaler Zwilling Vorteile?

Das ist zum Beispiel in der Automobilindustrie oder der Luft- und Raumfahrtbranche der Fall. Da geht es unter anderem um die Herstellbarkeit und Planbarkeit von Produkten. Um das zu untersuchen, baut man etwa ein Auto oder Flugzeug zuerst einmal im Computer – mit sämtlichen wichtigen Teilen und Funktionen. Inzwischen sind wir dank der Fortschritte bei der Rechenleistung so weit, dass wir fast alles digital darstellen können – und testen können, ob es funktioniert. Das geht auch mit einem Gebäude, Kleidungsstück oder einer ganzen Kommune. An deren digitalem Abbild lassen sich unter anderem Verkehrsströme nach dem Bau einer neuen Straße oder Brücke und ihre Folgen untersuchen.

Wie aufwendig ist es, einen digitalen Zwilling zu erstellen?

Das Erstellen eines digitalen Zwillings von null an – also, wenn noch keinerlei Daten vorhanden sind – ist sehr aufwendig. Doch in den meisten Bereichen werden bereits digitale Instrumente eingesetzt – etwa in der Industrie, wo Konstrukteure seit Langem mit der CAD-Technik arbeiten. Dabei werden Produkte oder Bauteile am Rechner gestaltet, und die dabei entstehende elektronische Beschreibung lässt sich in einen digitalen Zwilling integrieren. In der kommunalen Planung gibt es geografische Informationssysteme, die etwa Daten zur Hochwassergefahr oder über die Altersstruktur der Bevölkerung in einzelnen Stadtteilen enthalten. Auch sie können als Basis für

einen digitalen Zwilling dienen. Allerdings muss man dafür Sorge tragen, dass geeignete und aktuelle Daten verwendet werden – und dass man die richtig kombiniert, um einen Gesamtblick auf ein Produkt oder eine Gemeinde zu erhalten.

Inwiefern spielen dabei Höchstleistungsrechner eine Rolle?

Das zentrale Thema ist die digitale Konvergenz. Seit etwa 15 Jahren spricht man von Big Data und dem Ende der Theorie. Der Gedanke ist: Wir haben so viele Daten, dass wir gar nicht mehr verstehen müssen, was dahintersteckt. Doch das setzt voraus, dass an die riesigen Datenmengen kluge Fragen gestellt werden. Denn nur so lassen sich neue Erkenntnisse gewinnen. Was steckt hinter den Daten? Und wie hängen diese zusammen? Und um kluge Fragen stellen zu können, sind Methoden erforderlich, um die Daten auszuwerten. Dazu gehört etwa die Künstliche Intelligenz. Der letzte Punkt schließlich ist: Um die Fülle an Daten damit zu analysieren, braucht es eine enorme Rechenleistung. Es müssen also drei Dinge zusammenkommen: sehr viele Daten, eine Analyseverfahren wie die Künstliche Intelligenz und ein Höchstleistungsrechner. Nur mit dieser Kombination lassen sich anhand eines digitalen Zwillings komplexe Zusammenhänge erkennen.

Gibt es dafür auch Grenzen?

Produkte wie ein Fahrzeug lassen sich, wenn ausreichend Rechenleistung zur Verfügung steht, sehr genau und zuverlässig simulieren. Unsicherheiten kommen immer dann ins Spiel, wenn es um menschliches Verhalten geht. So kann man zwar in einer Stadt die Straßen und Wege nachabbilden sowie die Tatsache, dass eine bestimmte Zahl von Menschen zur Arbeit fährt oder zur Schule geht. Allerdings: Ob ein bestimmter Verkehrsteilnehmer



an einer Kreuzung links oder rechts abbiegt, lässt sich nicht vorhersagen – doch es kann weitreichende Folgen haben.

Können Sie ein Beispiel dafür nennen?

Ein Beispiel ist das Unglück bei der Love-Parade in Duisburg 2010, bei dem 21 Menschen ums Leben kamen. Das Ereignis wurde im Vorfeld eingehend simuliert – mit dem Resultat, dass das Sicherheitskonzept der Veranstalter funktionieren kann. Dennoch endete die Love-Parade in einer Katastrophe. Der Auslöser war wahrscheinlich, dass eine Gruppe von Menschen sich anders verhalten hat, als es das Konzept vorgesehen hatte. Sie kehrten inmitten des Besucherstroms plötzlich um. Dadurch entstand Panik und die Situation geriet außer Kontrolle. Die Simulation zum Sicherheitskonzept war wissenschaftlich exzellent. Aber was Menschen tun, lässt sich nicht berechnen. Ein anderes Beispiel ist der neue Bahnhof Stuttgart21: Wie viele Züge wird er pro Stunde abwickeln können? Das ist eine für die Bauplanung entscheidende Frage. Sie hat eine technische Komponente, die man leicht bewältigen kann. Es geht darum: Wie viele Gleise und wie viele Weichen gibt es? Was sich hingegen nicht vorhersagen lässt, ist die Tatsache, wie sich die Menschen etwa beim Ein- und Aussteigen verhalten. Man kann nicht klar vorhersehen, was wirklich passiert, und muss daher bei einer Simulation Annahmen machen. Das galt etwa auch während der Corona-Pandemie.

Inwiefern?

Im Verlauf der Pandemie war immer die Frage: Was wird passieren? Was können wir dagegen tun? Und was sind die Auswirkungen der Maßnahmen? Nichts davon ließ sich einfach so vorhersagen. Daher wurde simuliert, und Annahmen mussten getroffen werden. Die Ressourcen für die Pandemiesimulationen haben wir am HLRS bereitgestellt. Bei den Simulationen haben wir eng mit Experten des Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung zusammengearbeitet. Das Ziel war es stets, möglichst schnell einschätzen zu können, wie sich die Lage weiterentwickeln wird. Doch das hat zu einer massiven Interaktion zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit geführt. Denn man hat deutlich die Kollision eines digitalen Zwillinges mit der Realität gesehen – die Prognosen stimmten oft nicht mit der tatsächlichen Entwicklung überein. Und man hat gesehen, wo die Grenzen sind – weil eben auch ein Virus kein lebloses Objekt ist wie beispielsweise ein Auto.

Was bedeutet das?

Bei einem Auto lässt sich nach Crashesimulationen sehr präzise vorhersagen, was bei einem Auffahrunfall geschieht. Jedes Exemplar eines bestimmten

Fahrzeugmodells ist auf die gleiche Weise gefertigt. Das Virus hingegen hat sich kontinuierlich und unvorhersehbar verändert – und das zunächst un bemerkt. Daher hatten wir einen unvollständigen digitalen Zwilling, aus dem aber reale Maßnahmen abgeleitet werden mussten. Das war eine Herausforderung, da solche Unsicherheiten der Öffentlichkeit erklärt werden müssen. Aber es war gleichzeitig ein Glücksfall, weil die Gesellschaft jetzt anfängt zu verstehen, was wir mit unseren Superrechnern leisten – und warum das so viel Geld kostet.

Gibt es Ansätze, das menschliche Verhalten bei Simulationen doch zu berücksichtigen?

Ja, die gibt es. Man hat eigene Methoden entwickelt: sogenannte agentenbasierte Methoden. Jede Person wird dabei durch einen digitalen Agenten dargestellt. Diesen Agenten schreibt man dann bestimmte Eigenschaften zu. Man berechnet, was geschieht, wenn zwei Agenten aufeinandertreffen, oder wenn ein Agent einer Gefahr wie einem Feuer ausgesetzt ist. Auf diese Weise lässt sich zum Beispiel ein Stadionneubau planen, bei dem verlässliche Fluchtwege notwendig sind. Deren Anordnung lässt sich am Rechner variieren, und mit statistischen Methoden kann man dann beschreiben, wie sich die Menschen verhalten. Mit der Statistik wird versucht, möglichst alle Eventualitäten zu berücksichtigen. Die Umsetzung der Ergebnisse solcher Berechnungen sieht man an vielen modernen Gebäuden. Denn Simulationen haben zum Beispiel ergeben, dass eine Säule mitten in einem langen Gang den Menschen im Notfall bei der Orientierung hilft. Sie laufen dann geschmeidig an der Säule vorbei. Der Menschenstrom ist dadurch geordneter, als wenn es die Säule nicht gäbe.

Wie erklären Sie den Menschen, was Sie tun, wie solche Ergebnisse zustande kommen und welche Bedeutung sie haben?

Wir setzen damit schon in Schulen an, etwa in einem Projekt namens „Simulierte Welten“. Da gehen wir direkt in die Schulen und erklären den Kindern und Jugendlichen, wie eine Simulation funktioniert. Und wir erklären ihnen auch, warum sie manchmal nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmt – wie bei Stuttgart21. Wir gehen häufig an die Öffentlichkeit und versuchen, das Thema zu erklären. Vor der Pandemie war ich rund ein Dutzend Mal im Jahr mit Vorträgen bei öffentlichen Veranstaltungen. Daneben beschäftigen wir uns intensiv und professionell mit der Frage: Wie lässt sich das Thema so präsentieren, dass die allgemeine Öffentlichkeit es versteht? Dazu haben wir eine Abteilung für Philosophie gegründet, die es so sonst an keinem anderen Rechenzentrum gibt. Die Forscher darin arbeiten unter anderem mit

»Drei Dinge müssen zusammenkommen: viele Daten, Künstliche Intelligenz und eine große Rechenleistung«

•

»Menschliches Verhalten lässt sich nicht vorhersagen«



HLRS-Direktor Michael Resch (links) im Gespräch mit bild-der-wissenschaft-Redakteur Ralf Butscher.

Soziologen und Politikwissenschaftlern zusammen. Mit diesen diskutieren wir etwa darüber, wie sich komplexe Inhalte verständlich erklären lassen – und gleichzeitig so, dass die Menschen sie akzeptieren. Zudem haben wir kürzlich ein Projekt gestartet, das sich mit der Frage beschäftigt, wie sich die Energiewende mithilfe eines digitalen Zwillings für eine Stadt simulieren lässt. Dieser verrät den Planern unter anderem, wie eine optimale Energiesteuerung für die Kommune aussieht.

Sie erwähnten das als ein Alleinstellungsmerkmal des HLRS. Was zeichnet diese Einrichtung sonst gegenüber anderen Supercomputing-Zentren aus?

Es gibt in Deutschland drei Höchstleistungsrechenzentren, die auf unterschiedliche Dinge spezialisiert sind. Unsere zentrale Aufgabe ist es, den Bereich der Ingenieurwissenschaften abzudecken – und außerdem das, was wir Global Systems Science nennen: etwa Pandemien, globale Geldflüsse und Fake News. Daraus ergibt sich ein Merkmal, das weltweit einmalig ist: Wir arbeiten eng mit Wirtschaft und Industrie zusammen. Jährlich nutzen rund 60 bis 70 Firmen unsere Rechner, was zu einem ausgeprägten Technologie- und Know-how-Transfer aus der Wissenschaft in die Wirtschaft führt. Das gibt es sonst nirgends.

Gibt es weitere Aspekte?

Wir haben einen starken Fokus auf Nachhaltigkeit. Schon sehr früh haben wir erkannt, dass unser Energieverbrauch drastisch steigen wird. Das erfordert auch andere Kühlmethoden. Heute kühlen wir unsere Rechner mit Flüssigkeit. Die dazu benutzten Rohre müssen wir mit Chemikalien sauber halten. Für die damit verbundenen Umweltrisiken übernehmen wir Verantwortung, und wir versuchen, sie so gering wie möglich zu halten – etwa, indem wir die Abwärme unserer Rechner zum Heizen nutzen. Das hat dazu geführt, dass wir seit 2020 als erstes und bislang einziges Höchstleistungsrechenzentrum das europäische Siegel für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung (EMAS) tragen.

Sie haben bereits die Zusammenarbeit zwischen dem HLRS und der Wirtschaft angesprochen. Wie verläuft diese?

Ein Beispiel dafür ist das Unternehmen Porsche, das etwa Konstruktionsaufgaben mithilfe unserer Supercomputer bewältigt. Doch eine solche Kooperation bringt zunächst viele Fragen mit sich: Was braucht der Kunde? Wann braucht er das? Wie kommt er an das System heran? Das bringt Sicherheitsfragen mit sich. Wir möchten, dass externe Unternehmen unser



System nutzen – aber wir möchten nicht, dass jemand einfach so auf das System zugreift. Das andere Thema ist die technische Abwicklung: Wer bei uns rechnet, kommt in eine Warteschlange, die sukzessive abgearbeitet wird. Die meisten Rechenjobs für die Industrie sind für unsere Verhältnisse leicht und schnell zu bewältigen. Diese werden zwischendurch abgearbeitet und helfen dabei, unsere Systeme gleichmäßig auszulasten. Dafür mussten wir unsere Konzepte anpassen. Eine Herausforderung anderer Art ist die steuerliche Frage. Da wir Fördergelder von Bund und Land beziehen, dürfen wir nicht einfach Erträge aus der Industrie erzielen. Wir müssen die Einnahmen reinvestieren.

Wie gelangen Sie zu Partnern aus der Wirtschaft?

In der Regel kommen sie auf uns zu – nachdem sie durch unsere Aktionen, etwa bei Veranstaltungen der IHK, auf uns aufmerksam geworden sind. Dazu ein Beispiel: Eine Firma aus Stuttgart, die sich auf die Produktion von Animationsfilmen spezialisiert hat, bekam erstmals den Auftrag für einen großen Film: Biene Maja. Dauer: 90 Minuten. Das erforderte einen weit größeren Rechenaufwand als bei den sonst von dem Unternehmen erstellten Kurzfilmen. Es ging um rund 300.000 Bilder, die zu berechnen waren. Der Auftrag ließ sich dank der Rechenkapazität des HLRS stemmen. Allerdings: Da die Bandbreite der Internetverbindung nicht ausreichte, beförderte ein Mitarbeiter die rohen und die bearbeiteten Bilddaten auf Festplatten per „Turnschuhtransfer“ zwischen dem Unternehmen und dem HLRS hin und her. Grundsätzlich gilt: Jeder Kunde ist anders. Dafür sind wir offen und finden gerne Lösungen. So entsteht immer mehr Know-how bei uns.

Welche Besonderheiten haben die Technologien, die das HLRS einsetzt?

Wir arbeiten grundsätzlich mit den gleichen Prozesstechnologien, die auch in einem Handy oder Laptop stecken. Aber wir arbeiten mit Varianten, die auf Schnelligkeit und Effizienz ausgerichtet sind – und daher auch meist teurer sind. Oft steht bei uns neueste Technologie schon, bevor diese bei privaten Computerbenutzern Einzug findet. Üblicherweise wird der technische Fortschritt auf diesem Gebiet durch die Größe eines Schaltelements beschrieben. Und diese Elemente werden seit Jahrzehnten immer kleiner – nach dem sogenannten Mooreschen Gesetz: Alle 18 Monate lassen sich doppelt so viele Schaltelemente auf die gleiche Fläche packen. Diese Änderungen an der Technologie haben den großen Vorteil, dass sie langjährig erprobt sind. Doch sie hat den Nachteil, dass die Entwicklung irgendwann ein Ende erreichen wird, da die Verkleinerung durch die Größe der Atome an eine natürliche Grenze

stößt. Zugleich wird die Fertigung herkömmlicher Rechner immer teurer. Daher erwarten wir, dass wir gegen Ende dieses Jahrzehnts auf andere Technologien umsteigen müssen. Und wir befassen uns mit der Frage: Welche Technologien könnten das sein?

Wie lautet die Antwort auf diese Frage?

Wir beteiligen uns an einem Projekt, in dessen Rahmen wir den Quantencomputer in Ehningen testen können. Zudem stehen wir in Kontakt mit Prozessorherstellern, um auszuloten: Wie können konventionelle Prozessoren auch dann noch besser werden, wenn sie sich nicht mehr weiter verkleinern lassen? Die Antwort beruht auf einem intelligenteren Design. Quantencomputer stehen noch am Anfang ihrer Entwicklung, doch sie haben ein enormes Weiterentwicklungspotenzial. Man muss allerdings zunächst herausfinden, inwiefern sie mit ihrer grundsätzlich anderen Logik für die Lösung unserer Probleme geeignet sind. Das Grundprinzip eines Quantencomputers ist seine große Parallelität: Man kann beliebig viele Zustände gleichzeitig haben und damit auch beliebig viele Lösungen gleichzeitig berechnen. Am Ende wird geschaut, welche Lösung die beste ist. Wie sich dieses Quantenkonzept praktisch nutzen lässt – außer zur Verschlüsselung von Daten –, ist noch nicht klar. Das wollen wir in Forschungsprojekten wie diesem herausfinden.

Und wie steht es um das intelligente Chipdesign?

Mit der intelligenten Nutzung der herkömmlichen Rechnertechnik geht in puncto Leistungssteigerung noch ein immenses Potenzial einher. Am Ende des Jahrzehnts werden wir nicht mehr sagen: Unsere Rechner werden schneller – sie werden besser. Was viele nicht wissen: Alle privat oder im Beruf verwendeten Computer sind praktisch viel langsamer, als sie theoretisch sein könnten. Das zu ändern, ist Zukunftsmusik.

Welche Rolle spielt dabei die Software?

Die Software spielt eine sehr große Rolle, indem sie das Speichermanagement optimiert, d.h. die Abläufe im Rechner möglichst effizient und vorausschauend steuert. Im Fachjargon heißt das Prefetching. Hinzu kommt das Scoreboarding. Da geht es darum, die Aufgaben im Computer so zu verteilen, dass jedes Element möglichst immer etwas zu tun hat. Die Leistung des Rechners hängt auch davon ab, wie viele Elemente parallel arbeiten. Unsere Erfahrung zeigt: Allein durch simple Verbesserungen an einem Programm lässt es sich um einen Faktor 1.000 bis 10.000 beschleunigen.

Das sind doch gute Aussichten. Vielen Dank, Herr Professor Resch, für das Gespräch.

»Jahr für Jahr nutzen rund 60 bis 70 Unternehmen unsere Rechnerysteme«

•

»Ein intelligentes Chipdesign und eine gute Software bieten noch reichlich Potenzial für bessere Leistung«

Stadtplanung als Gesamtschau

Ein digitaler Zwilling hebt die Stadtplanung auf ein neues Niveau.
Davon profitieren Politik, Verwaltung und Zivilgesellschaft gleichermaßen.

von MICHAEL VOGEL

In der CAVE – einem Raum zur dreidimensionalen Projektion virtueller Welten – können die Forscher Stadtquartiere wie hier das Gelände der Universität in Stuttgart-Vaihingen virtuell begehen.



In einem zunächst recht unscheinbar wirkenden Raum am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) gibt es einen Vorgeschmack auf die Stadtplanung von morgen. Hier entstehen ganze Städte als virtuelle 3D-Darstellung. Wer sich ihr mit einer Virtual-Reality-Brille nähert, sieht eine Stadt aus der Vogelperspektive oder steht auf ihren Straßen und Plätzen – im Maßstab 1:1 mit realitätsnahem Umfeld. Was schon optisch beeindruckend ist, hat einen tieferen Sinn: Solche Visualisierungen sollen die Stadtplanung verbessern, weg vom Kleinklein der Einzelmaßnahmen und hin zu einer integrierten Gesamtschau.

„In einer Stadt hängt alles miteinander zusammen – Gebäude, Energie, Umwelt, Mobilität, soziale und ästhetische Aspekte“, sagt Uwe Wössner. Der Ingenieur leitet am HLRS die Abteilung Visualisierung und forscht mit seinem Team und seinen Kooperationspartnern an Methoden, mit denen sich dieser Komplexität bei der Planung und Entscheidungsfindung besser Rechnung tragen lässt.

„Wenn heute ein Areal neu bebaut und gestaltet wird, dann sind daran diverse Fachplanungsbüros beteiligt“, erklärt Wössner. Ein Büro erstellt zum Beispiel den Bebauungsplan mit Gebäuden und Grünflächen, andere sind für das Verkehrskonzept oder die Energie- und Wärmeversorgung verantwortlich. „So entstehen viele Teilergebnisse, oft in Form von zweidimensionalen Plänen und Karten. Aber es entsteht keine integrierte Gesamtschau“, beklagt Wössner. Die Folgen kennen viele vom privaten Hausbau: Auf der Baustelle erweist sich manches als unpraktikabel, was in der Planung problemlos ausgesehen hat. Auf der Ebene der Stadt- und Quartiersplanung ist das Grundproblem ähnlich.

Simulieren und visualisieren

Abhilfe würde ein digitaler Zwilling schaffen. „Er besteht aus einem realistischen Modell der Stadt mit ihren Gebäuden und Straßen. Dieses Modell lässt sich dann immer weiter mit georeferenzierten Daten anreichern“, erklärt Wössner. Georeferenziert bedeutet, dass die Daten sich exakt einem Ort im Modell zuordnen lassen. Solche Daten können

sehr unterschiedlicher Natur sein: etwa Verkehrsströme, die Konzentration von Stickoxiden, Luftströmungen, der Wasserbedarf städtischer Bäume oder das Müllaufkommen. „Dann lässt sich vieles simulieren und visualisieren, sodass Verwaltung, Politik und Zivilgesellschaft sich ein besseres Bild vom Ist-Zustand und den womöglich geplanten Maßnahmen machen können – bevor das Kind in den Brunnen gefallen ist“, stellt der Forscher fest.

Wie man sich eine solche integrierte Planung vorstellen kann, verdeutlicht ein 2023 angelaufenes Forschungsprojekt, das vom HLRS und der Universität Stuttgart gemeinsam verwirklicht wird. In

dem Vorhaben namens DiTENS (Discursive Transformation of Energy Systems) wollen die Projektbeteiligten den Gestaltungs- und Entscheidungsprozess für eine nachhaltige lokale Energieversorgung mit digitalen Zwillingen und Visualisierungen erleichtern. Bekanntlich soll die gesamte Europäische Union bis 2050 – Deutschland sogar schon bis 2045 – klimaneutral werden.

Neben dem Sektor der Stromversorgung muss sich dafür auch maßgeblich der Wärmesektor verändern. Denn die Erzeugung von Wärme für Gebäude verursacht in Deutschland ungefähr ein Fünftel der Treibhausgasemissionen und verbraucht ein Drittel der Energie.

Abwärme für den Campus

Im Forschungsprojekt betrachten Wössner und die weiteren Beteiligten zunächst den Stuttgarter Universitätscampus Vaihingen, der bereits bis 2030 klimaneutral werden soll. Eine wichtige Komponente ist ein Neubau, in der ein neuer Supercomputer des HLRS stehen wird. „Mit der Abwärme dieses Rechners lässt sich im Sommer der gesamte Wärmebedarf des Campus decken, im Winter immer noch rund ein Drittel“, verdeutlicht Uwe Wössner das Potenzial zum Energiesparen. Bislang verpufft die Abwärme der existierenden Rechner des Stuttgarter Höchstleistungsrechenzentrums weitgehend ungenutzt.



Folgen und Hemmnisse von Planungen werden dank einer dreidimensionalen Visualisierung greifbar.

In der virtuellen 3D-Darstellung des Uni-Campus steht das neue Gebäude bereits und ist auch im Inneren begehbar. Unterirdisch verlaufen auf dem virtuellen Gelände Rohrleitungen, die das Gebäude mit dem Nahwärmenetz des Campus verbinden, um die Abwärme nutzbar zu machen. „So lässt sich sehr realistisch simulieren, welche technischen Maßnahmen im Bestandwärmenetz sowie möglicherweise an angeschlossenen Bestandsgebäuden erforderlich werden“, erklärt Wössner.

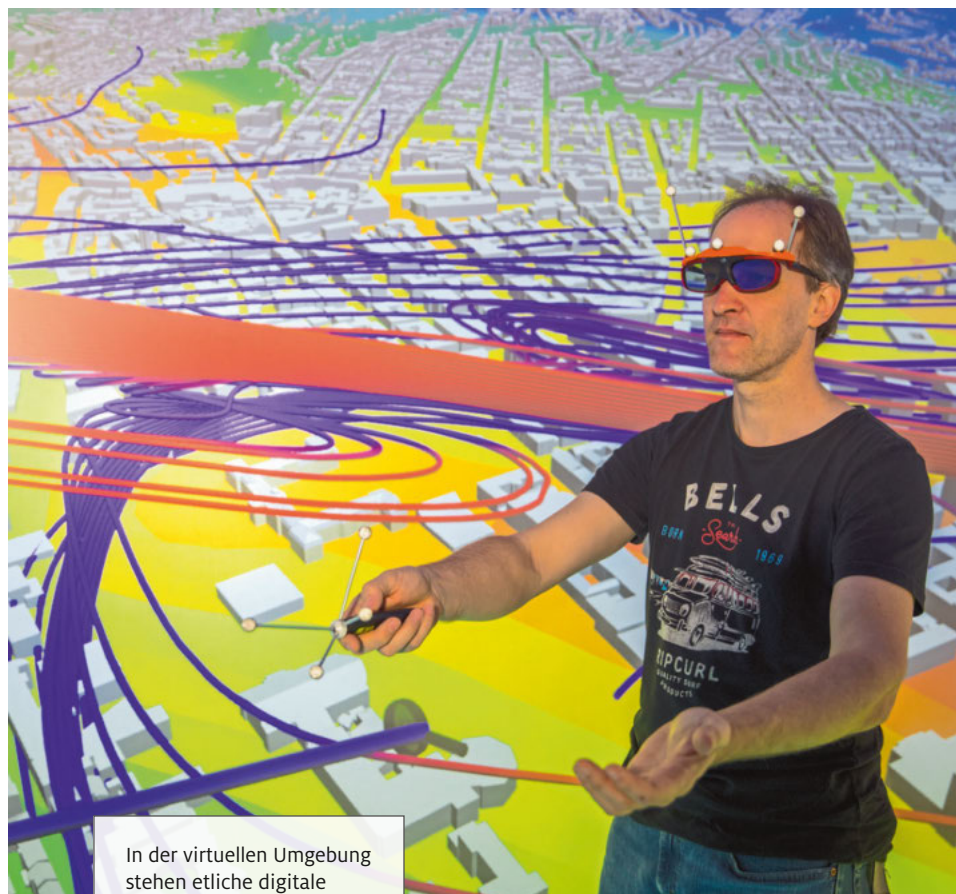
Doch der Campus ist bei DiTeNS nur eine der Fallstudien, um das Thema Energieversorgung mit der Stadtplanung auf neue Weise zu verbinden. Im Rahmen des Projekts sollen weitere Beispielstudien folgen, gemeinsam mit Kommunen aus Baden-Württemberg. Ziel ist es, dass zum Projektende ein digitales Modell und leicht anpassbare Algorithmen für die Einbindung von Daten vorliegen, um digitale Zwillinge rasch für künftige Anwendungsfälle aufbauen zu können. Alles wird Open Source sein, also frei zugänglich.

Verschiedene Interessen vereinen

„Das Thema Energie ist ein Gemeinschaftsakt“, sagt Wössner. Energieversorger, Gerätehersteller, Handwerk, Wohneigentümer und Bewohner haben Interessen, die nicht übereinstimmen müssen. Soll die Wärmewende gelingen, gilt es aber, alle Interessen so gut wie möglich unter einen Hut zu bringen. „Mit Simulationen und Visualisierungen geht das einfacher“, ist der Wissenschaftler überzeugt. Das könne selbst bei so schwierigen Themen wie der Windkraft helfen: „Es macht einen Unterschied für die Akzeptanz vor Ort, ob ich nur die technischen Daten einer Windenergieanlage und ihren Standort genannt bekomme oder ob ich eine realitätsnahe Simulation sehe, um zum Beispiel die optische Anmutung zu beurteilen.“

Ein Zwilling von Herrenberg

Die rund 30 Kilometer von Stuttgart entfernte 30.000-Einwohner-Stadt Herrenberg hat in den vergangenen Jahren gemeinsam mit dem HLRS und weiteren Forschungseinrichtungen einen digitalen Zwilling genutzt, um verschiedene



In der virtuellen Umgebung stehen etliche digitale Werkzeuge zur Verfügung.

Fragen zu klären. Herrenbergs Kernstadt hat aufgrund früherer Planungsentscheidungen ein hohes Verkehrsaufkommen – mit allen Folgen, zum Beispiel Lärm und Luftschadstoffe. Als Vorarbeiten zur Fortschreibung des Verkehrswegeplans simulierte das HLRS-Team aufwendig die

Per App wurde erfasst, wie die Bürger ihre Stadt emotional einschätzen

Bewegungen von Fahrzeugen und Menschen in der Herrenberger Kernstadt. Dazu speiste es Daten zur Topografie, zum Straßenverlauf und zu realistischen Verkehrsflüssen in den digitalen Zwilling ein und spielte auf dieser Grundlage unterschiedliche Szenarien durch. Die verwendete Simulationssoftware war zweckentfremdet: Für gewöhnlich dient sie zur physikalischen Berechnung von

komplexen Strömungen, zum Beispiel an Flugzeugflügeln oder in Motoreinspritzdüsen.

Außerdem erfassten die Projektbeteiligten mit einer App die emotionalen Einschätzungen von Bürgerinnen und Bürgern zu verschiedenen Gegenden ihrer Stadt: „wohnlich“, „unsicher“, „hässlich“ zum Beispiel. Des Weiteren setzte die Stadt auf den Bürgerdialog, ergänzt – als Übersetzungshilfe – um Visualisierungen auf Basis des digitalen Zwillings. Teils geschah das mit mobilen Virtual-Reality-Systemen. So ließen sich auch Gruppen erreichen, die sonst eher nicht auf Dialogformate ansprechen, zum Beispiel Jugendliche oder Menschen, für die Deutsch nicht Muttersprache ist. In der soziologischen Begleitforschung bescheinigten die Teilnehmer der Bürgerdialoge der digitalen Übersetzungshilfe eine positive Wirkung.

„Mit der Stadt Herrenberg arbeiten wir derzeit an einer Erweiterung des digitalen Zwillings“, verrät Wössner. Es geht



Mit einem präparierten Rollstuhl lässt sich in der CAVE zum Beispiel testen, ob ein Platz barrierefrei befahrbar ist.

etwa um weitere Bebauung und die aufwachsende Vegetation in den nächsten zwei Jahren. Wegen der Klimaerwärmung müssen Bäume im Stadtgebiet über den Sommer häufiger gegossen werden. Herrenberg lässt dazu nun testweise Bäume mit Feuchtesensoren ausstatten. Deren Daten sollen per Funk ausgelesen und in den digitalen Zwilling eingespeist werden. So bekäme die Verwaltung einen Überblick und müsste nur dann Personal zum Gießen schicken, wenn es wirklich nötig ist. Das spart Ressourcen.

Im südniedersächsischen Hildesheim assistierte das HLRS im Rahmen einer Dienstleistung. Erneut ging es um den Bürgerdialog. Ein ehemaliges Militärgelände

in der 100.000-Einwohner-Stadt war für die städtebauliche Nutzung freigeworden. In der Bevölkerung kamen jedoch Sorgen auf, dass auf dem Areal eine Retortenstadt entstehen könnte. „Mithilfe unserer Visualisierung auf der Basis eines digitalen Zwillings konnten die Verantwortlichen vor Ort diese Bedenken zerstreuen und den Dialog in kooperative Bahnen lenken“, berichtet Wössner. Auch als eines der ersten Gebäude des Quartiers stand und Anwohner über starke Winde klagten, nutzte das verantwortliche Architekturbüro noch einmal die HLRS-Dienste. „Wir konnten mit einer Simulation des gesamten geplanten Quartiers zeigen, dass sich das Thema

durch die weitere Bebauung und die wachsende Vegetation innerhalb von zwei Jahren von selbst erledigen wird“, sagt Wössner. „Denn dadurch verändern sich die Luftströmungen im Gebiet vorteilhaft.“

Stuttgart wiederum ist der Ort eines Verbundforschungsprojekts, welches das HLRS gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und dem Allgemeinen Deutschen Fahrrad-Club (ADFC) durchführt. „Cape Reviso“ lautet der griffige Projektname für das „Cyclist And PEdestrians on REal and Virtual Shared rOads“.

Die Frage nach Komfort und Sicherheit

Bekanntlich wollen viele Stadtverwaltungen den nicht motorisierten Verkehr – zu Fuß oder mit dem Fahrrad – stärken, um ihre Klimaziele im Verkehrssektor und eine bessere Aufenthaltsqualität zu erreichen. Doch Wissenschaftler wissen, dass die Wahl eines Verkehrsmittels nicht nur von Kosten und Zeitaufwand abhängt, sondern auch von der Frage, ob eine bestimmte Mobilitätsform als angenehm und sicher empfunden wird.

„Will eine Stadt den Fahrrad- und Fußverkehr fördern, muss sie also auch die Unannehmlichkeiten reduzieren“, sagt Wössner. „Dazu kann sie nicht einfach die Unfallstatistik heranziehen, um kritische Stellen zu identifizieren. Denn Ereignisse wie Beinahezusammenstöße werden dort nicht erfasst, beeinflussen aber massiv das Wohlbefinden von Betroffenen.“

Ein Reallabor am Marienplatz

Wie so eine Analyse gelingen kann, untersucht das Cape-Reviso-Team zunächst am Stuttgarter Marienplatz, der als Reallabor dient. Er ist ein zentraler Platz im Süden der baden-württembergischen Landeshauptstadt. Bei ihm gibt es eine U-Bahn-Station, Bus- und Taxihaltstellen sowie die Endstation der Zacke, Stuttgarts Zahnradbahn. Zudem liegt der Marienplatz auf einer der Haupttrouten des städtischen Fahrradverkehrsnetzes. Wochenmärkte finden hier ebenfalls statt. Der Ort ist ein beliebter Treffpunkt. Kurzum: Hier pulsiert das Stadtleben.

Leider kommt es immer wieder zu Konflikten im Verkehr, besonders betrof-



3D-Darstellungen in der virtuellen Welt erleichtern es, Menschen in die Neugestaltung städtischer Bereiche einzubeziehen.

fen sind Menschen, die zu Fuß oder per Rad unterwegs sind. Stuttgart verfügt bereits über einen ständig gepflegten digitalen Zwilling mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Die Idee der Projektpartner war es daher, den Platz möglichst detailgetreu im digitalen Zwilling abzubilden und Realdaten der Verkehrssituation aufzunehmen. „Auf dieser Basis lassen sich dann mögliche Änderungen in der Verkehrsführung zunächst in der Simulation untersuchen“, erläutert Wössner.

Die Erhebung der Daten erfolgt dabei auf drei Ebenen. Mit analytischen Methoden lassen sich die bevorzugten Wege von Radfahrern und Fußgängern am Marienplatz erfassen und potenzielle Gefahrenstellen identifizieren. Das ist sozusagen die Metaperspektive. Zudem rüsten Freiwillige ihre Räder mit GPS und Abstandssensoren aus, tragen Sensoren am Handgelenk und nutzen eine App am Lenker, um Gefahrensituationen unmittelbar zu erfassen. Über den Sensor

am Handgelenk lassen sich etliche physiologische Daten wie Puls und Hautwiderstand messen. Die teilnehmenden Fußgängerinnen und Fußgänger sind entsprechend ausgerüstet, nur dass sie die Abstandssensoren in Rucksäcken auf dem Rücken tragen. Die gemessenen physiologischen Daten lassen sich also den Ereignissen in der Umgebung räumlich zuordnen.

Kameras mit Künstlicher Intelligenz

Zudem montierte das HLRS-Forscherteam Kameras am Marienplatz, um die Bewegungen im Rad- und Fußverkehr automatisch zu erfassen. „Sie arbeiten mit Künstlicher Intelligenz und müssen deshalb keine Bilder speichern“, erklärt Wössner die Datenschutzkonformität der Installation. Die Datenverarbeitung erfolgt unmittelbar in den Kameras. Sie speichern dann nur anonymisierte Metadaten über die Verkehrsteilnehmer und deren Verhalten: Geht jemand zu Fuß oder ist er mit dem Rad unterwegs? Fährt

er, bremst er oder steht er? Mit dieser umfangreichen Datenerhebung sorgen die Wissenschaftler des HLRS für valide Simulationen.

Parallel zu dem Labor am Stuttgarter Marienplatz gibt es im Rahmen des Projekts „Cape Reviso“ inzwischen zwei weitere Reallabore in Karlsruhe und Herrenberg. Die Fragestellung, der die Forscher nachgehen, ist an allen drei Orten identisch.

Die Stadtplanung der Zukunft ist also digital. Statt Präsentationen und Plänen gibt es Visualisierungen von geplanten Veränderungen. Virtuelle 3D-Darstellungen heben das Ganze nochmals auf ein neues Niveau. Und hinter all dem steht der digitale Zwilling als wachsendes Modell der Stadt. „Dank solcher Technologien können wir Menschen anschaulich in die Gestaltung des städtischen Raums einbeziehen und liefern ideale Voraussetzungen für die Planung“, sagt HLRS-Experte Wössner. „Immer mehr Kommunen erkennen dieses Potenzial.“ ■



Höchstleistungsrechnen verändert nicht nur die Wissenschaft. Im Zeitalter von Big Data und Künstlicher Intelligenz treten philosophische und ethische Fragen in den Vordergrund. Daher gibt es am HLRS ein Philosophieteam.

Vertrauensfrage für Algorithmen

Die Digitalisierung wirft nicht nur technische, sondern auch ethische Fragen auf. Ein Team am HLRS forscht an praktisch nutzbaren Empfehlungen.

von MICHAEL VOGEL

Dass ein Doktorand der Philosophie Mitarbeiter des Höchstleistungsrechenzentrums Stuttgart (HLRS) ist, mag vielleicht überraschen. Geht es hier doch primär um leistungsstarke Computer, um Algorithmen, Modelle und Simulationen. Doch Nico Formanek, seit 2023 Leiter der Abteilung

„Philosophy of Computational Sciences“, ist nicht der Einzige: „In unserer Gruppe arbeiten wir zu sechst. Alle haben eine Doppelqualifikation: oft einen mathematisch-naturwissenschaftlichen Studienabschluss, an den sich dann eine Promotion in Philosophie oder den Sozialwissenschaften anschloss.“

Denn da Computer immer weiter in alle Bereiche der Gesellschaft und des Arbeitslebens vordringen, wirft das eben nicht nur technische und naturwissenschaftliche Fragen auf, sondern auch ethische und erkenntnistheoretische. „An diesen Fragen forschen wir“, sagt Formanek.

Das HLRS ist dafür eine Art natürliches Biotop. Simulationen, künstliche Intelligenz (KI) und die Verarbeitung großer Datenmengen – sie gehen fast immer auch mit Fragen der Akzeptanz und des Vertrauens einher. Jüngstes prominentes Beispiel, das medial Aufmerksamkeit erfuhr, ist der KI-Chatbot ChatGPT, mit dem sich künftig wie mit einem Menschen chatten lassen soll. Sein öffentlich zugänglicher Prototyp hat in den vergangenen Monaten daher auch erneut Debatten über die gesellschaftlichen Implikationen solcher Chatbots ausgelöst.

Einzigartig in Deutschland

Formaneks Abteilung ist 2016 entstanden. Unter den drei nationalen Höchstleistungsrechenzentren in Jülich, Garching und Stuttgart ist sie ein Unikat. „Unser Vorteil ist, dass wir mit unserer Forschung sehr nah an den anderen Projekten des HLRS dran sind, die primär an technisch-naturwissenschaftlichen Fragestellungen forschen“, sagt Formanek. Sein Team arbeitet bei soziologischen oder wissenschaftshistorischen Fragestellungen empirisch, etwa mit Interviews, Umfragen und Reallaboren, bei philosophischen Fragestellungen viel mit der wissenschaftlichen Literatur, um daraus neue Gedanken abzuleiten.

So untersuchte die Abteilung in einem bereits abgeschlossenen Projekt zum Beispiel, welche Folgen es hat, wenn der Computercode in komplexen Simulationen nicht mehr von einzelnen Experten vollständig nachvollziehbar ist, wie sich dann Vertrauen herstellen lässt. In einem anderen Projekt zur Simulation von kosmetischen Operationen bei Kleinkindern mit deformiertem Schädel untersuchte die Philosophie-Abteilung des HLRS die Frage, wie sich Eltern entscheiden und wie Simulationen ihre Entscheidungen beeinflussen. „In diesem Fall machten wir Umfragen und beobachteten Diskussionen unter betroffenen Eltern in einschlägigen Foren“, berichtet Formanek.

In einem derzeit laufenden Projekt, das vom baden-württembergischen Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst finanziert wird, geht es um das Thema „Vertrauen und Information“. Durch die Digitalisierung, namentlich durch personenbezogene Daten und KI,



Nico Formanek leitet die Abteilung Philosophy of Computational Sciences.

wächst bekanntlich die Sorge, dass sich die neuen Möglichkeiten missbrauchen lassen. Auch die zersetzende Wirkung von Desinformationskampagnen in den sozialen Medien ist inzwischen hinlänglich bekannt. Das Projekt will klären, wie die wissenschaftliche Community sicherstellen kann, dass die von ihr entwickelten Modelle zuverlässig sind und eine Grundlage für öffentliche Entscheidungen liefern können. Und für alle Menschen relevant ist die Frage, wie sich vertrauenswürdige Informationen verlässlich erkennen lassen.

Verschiedene Formen von Vertrauen

„Es gibt Vertrauen zwischen Menschen, und es gibt Vertrauen zwischen Mensch und Maschine – und dieses Vertrauen ist nicht das gleiche“, umreißt Formanek das grundsätzliche Problem. „Menschen vertrauen einander implizit, solange nichts schiefliegt.“ Dagegen müsse das Vertrauen zwischen Mensch und Maschine „explizit werden“. Es muss eine Art Vertrauensbeweis geben. Inwieweit das möglich sei, hänge auch vom Vertrauensbegriff ab, für den es unterschiedliche Definitionen gebe. „Manche Fachleute argumentieren zum Beispiel, dass es zu einer Maschine gar kein Ver-

trauen geben kann, sondern nur so etwas wie Verlässlichkeit“, erklärt Formanek. „Der Vorteil dieses Begriffs ist, dass er sich mathematisch beschreiben lässt, also quantifizierbar wird.“

Das erleichtert die Sache, geht aber womöglich an manchen Problemstellungen vorbei. Mit einem Vertrauensbegriff wiederum, der „von der Annahme ausgeht, dass alle böswillig sind“, stiegen die Anforderungen: an die Implementierung eines Algorithmus, an den Rechenaufwand und an die Privatheit von Daten, etwa durch permanente starke Verschlüsselung. Letztlich ist alles auch eine Frage der Kosten. Was ist dann der richtige Weg? „Diese Abwägung ist nicht technischer Natur“, sagt Formanek.

Daher will sein Team bis zum Ende des Projekts einen zielgruppenspezifischen Rahmen entwickeln, der bei der Beurteilung grundlegender Fragen hilft. So soll die Gesellschaft qualitative Kriterien dafür an die Hand bekommen, wie sie KI-Angebote beurteilen kann. Die Politik soll quantitative Entscheidungskriterien erhalten, um die Vertrauenswürdigkeit von Algorithmen bewerten zu können. Und für die Fachleute soll der Rahmen problemspezifische Definitionen zum Vertrauensbegriff liefern. ■



„Wir wollen führend sein im europäischen Supercomputing“

Die EU-Organisation EuroHPC JU hat sich zum Ziel gesetzt, die Top-Position Europas im Hochleistungsrechnen wiederherzustellen. Direktor Anders Jensen erklärt, wie dies gelingen soll.

Das Gespräch führte RALF BUTSCHER

Anders Dam Jensen

ist seit September 2020 Exekutivdirektor des European High Performance Computing Joint Undertaking (EuroHPC JU). Es ist die Fortsetzung eines lebenslangen Interesses an Supercomputern, die an der Technischen Universität Dänemark begann, von der er einen Master of Science und einen Master of Business Administration besitzt. Nachdem er beim Unternehmen Symbol Technologies Pionierarbeit in der drahtlosen Netzwerktechnologie geleistet hatte, kam er als Direktor für IT zu Cargolux Airlines und war dort maßgeblich an der Ausgliederung des Spinoffs CHAMP Cargosystems beteiligt. 2011 wurde er Direktor ICTM für die NATO, verantwortlich für alle Informations- und IT-Dienste sowie eines der größten klassifizierten Netzwerke in Europa.

Anders Jensen, was ist die Aufgabe der EuroHPC JU?

Die Organisation wurde 2018 als EU-Einrichtung gegründet – aus der Erkenntnis heraus, dass die einzelnen europäischen Regierungen lange Zeit nicht in der Lage waren, ausreichend in das Hochleistungsrechnen zu investieren. Dies spiegelte sich deutlich in der Top-500-Rangliste der weltweit leistungsfähigsten Hochleistungsrechner wider. Europa geriet immer weiter ins Hintertreffen, weil die nationalen Investitionen für größere Systeme nicht ausreichten. Das EuroHPC JU sollte dieses Problem lösen: Es bündelt nun die Ressourcen der Europäischen Union, von 33 europäischen Ländern und drei privaten Partnern mit dem Ziel, Europa weltweit führend im Supercomputing zu machen.

Können Sie uns den Hintergrund erläutern?

Wir fördern und investieren in die Entwicklung eines europäischen Ökosystems für das Höchstleistungsrechnen. Das EuroHPC JU beschafft und installiert daher Supercomputer in ganz Europa. Europäische Wissenschaftler und Nutzer aus der öffentlichen Verwaltung und Industrie, die in den Mitgliedsländern des Gemeinsamen Unternehmens ansässig sind, können von diesen EuroHPC-Supercomputern, die zu den leistungsfähigsten der Welt gehören, profitieren. Wir investieren nicht nur in Höchstleistungsrechenkapazitäten in ganz Europa, sondern finanzieren auch ein ehrgeiziges Forschungs- und Innovationsprogramm in diesem Bereich mit dem Ziel, eine komplette europäische Supercomputer-Lieferkette zu entwickeln: von Prozessoren und Software bis hin zu Anwendungen auf diesen Systemen.

Was haben Sie bisher erreicht?

Seit seiner Gründung hat das Gemeinsame Unternehmen EuroHPC die Gesamtinvestitionen in das

Höchstleistungsrechnen in Europa erheblich gesteigert und Europas führende Position weltweit gesichert. Bisher wurden acht Höchstleistungsrechner in ganz Europa beschafft: in Bulgarien, Tschechien, Finnland, Italien, Luxemburg, Portugal, Slowenien und Spanien. Sechs davon sind bereits in Betrieb und können von europäischen Forschern genutzt werden. Alle diese Supercomputer sind in der Top-500-Rangliste. Zwei gehören zu den Top 5 der Welt: „LUMI“ in Finnland und „Leonardo“ in Italien, die den dritten und vierten Platz belegen. Ganz oben stehen die USA mit dem weltweit ersten Exascale-System: Frontier: ein Supercomputer, der 1.000 Peta-Flops, die Zahl der Gleitkommaoperationen pro Sekunde, übertrifft. Auf Platz 2 steht Fugaku in Japan.

Was machen Sie sonst noch?

Das Gemeinsame Unternehmen EuroHPC investiert auch in umweltfreundlicheres und nachhaltigeres Rechnen. LUMI in Finnland etwa ist nicht nur der drittstärkste Supercomputer der Welt, sondern auch einer der grünsten. LUMI ist, wie alle Systeme der EuroHPC JU, wassergekühlt. Damit entfallen die hohen Betriebskosten luftgekühlter Systeme, und der Energiebedarf wird reduziert. Dies ist ein wichtiger Schritt für Europa und für das globale Ökosystem der Höchstleistungsrechner.

Wie funktioniert die Förderung des EuroHPC JU?

Das Prinzip ist, dass die Europäische Union einen Teil der Finanzierung übernimmt und andere Partner den Rest beisteuern. Ein gutes Beispiel ist der finnische Supercomputer LUMI: Wir haben die Hälfte der Kosten übernommen und Finnland hat zusammen mit neun weiteren Ländern die andere Hälfte bereitgestellt. Das bedeutet, dass EuroHPC JU auch die Hälfte der Rechenkapazität besitzt, die wir Forschern aus ganz Europa zur Verfügung stellen.



Wer ist Teil des gemeinsamen Unternehmens?

Die Organisation besteht aus öffentlichen und privaten Mitgliedern: die EU, vertreten durch die Europäische Kommission, die Mitgliedstaaten und assoziierte Länder, die sich für eine Mitgliedschaft im Gemeinsamen Unternehmen entschieden haben, wie Montenegro, Nordmazedonien, Norwegen, Island, Serbien und die Türkei. Zurzeit haben wir 33 teilnehmende Staaten. Neben diesen öffentlichen Mitgliedern beteiligen sich drei private Partner.

Wie geht es weiter?

Bis 2024 wollen wir in Europa über Exascale-Supercomputing-Kapazitäten verfügen. Das EuroHPC JU beschafft derzeit einen Exascale-Supercomputer, der am Forschungszentrum Jülich in Deutschland installiert werden soll. Sein Name steht bereits fest: „Jupiter“. Deutschland wird 50 Prozent der Kosten tragen, das JU wird mit EU-Mitteln den Rest finanzieren. Der Auftrag für den Bau des Höchstleistungsrechners wird derzeit vergeben. Dieser europäische Supercomputer auf dem neuesten Stand der Technik ist ein bedeutender technologischer Meilenstein für Europa und wird einen großen Einfluss auf die Förderung der wissenschaftlichen Exzellenz in Europa haben.

Wie viel Geld steht zur Verfügung?

EuroHPC JU wird von seinen Mitgliedern gemeinsam mit einem Budget von rund 7 Milliarden Euro für den Zeitraum von 2021 bis 2027 finanziert. Der größte Teil davon stammt aus dem aktuellen langfristigen EU-Haushalt mit einem Beitrag von 3 Milliarden Euro. 1,9 Milliarden Euro werden wir für die Infrastruktur ausgeben. Das Budget für die neue Anlage in Jülich – für Beschaffung und Betrieb des Supercomputers über die gesamte Lebensdauer – beträgt 250 Millionen Euro aus den Mitteln des EuroHPC JU. Den Rest der Finanzierung wird Deutschland übernehmen.

Wie lange ist ein Supercomputer im Einsatz?

Wir rechnen mit etwa fünf Jahren. Das hängt von den Komponenten ab, die für den Bau des Rechners ausgewählt werden. Um eine längere Lebensdauer und eine bessere Nachhaltigkeit unserer Rechner zu gewährleisten, wollen wir mit unseren Partnern so weit wie möglich sicherstellen, dass die Rechner kontinuierlich aktualisiert werden. Leider werden die wichtigsten Bauteile nicht in Europa hergestellt. Wir haben schon vor langer Zeit die Möglichkeit verloren, einen Prozessor für einen solchen Computer in Europa zu bauen. Aber jetzt investieren wir viel Zeit und Geld, um dieses Know-how wiederzuerlangen. SiPearl, ein französisches Unternehmen, das im Rahmen der von uns finanzierten Europäischen Prozessorinitiative gegründet wurde, wird den ersten europäischen HPC-Prozessor seit Langem

auf den Markt bringen. Die Markteinführung wird für Anfang 2024 erwartet. Wir befassen uns auch mit einer anderen Art von Mikroprozessor: „RISC-V“. Das ist interessant, weil es eine Technologie mit offenen Standards ist. Wir haben kürzlich einen Aufruf zur Entwicklung solcher Prozessoren für Höchstleistungsrechner gestartet. Zudem sind wir dabei, sechs EuroHPC-Quantencomputer zu beschaffen und für die Forschung in ganz Europa bereitzustellen. Einer davon wird im Leibniz-Rechenzentrum in Garching installiert. Diese Technologie hat das Potenzial, in vielen Bereichen eine Wende herbeizuführen. Es gibt viele technische Ansätze, aber noch ist unbekannt, welcher der beste ist. Wir wollen das herausfinden.

Welchen Nutzen werden diese Systeme haben?

Quantencomputer können besonders gut Probleme lösen, die die Fähigkeiten herkömmlicher Computer, sogar von Supercomputern, übersteigen: Optimierungsprobleme zum Beispiel. Eine Idee ist es, einen Hochleistungs- mit einem Quantencomputer zu verbinden. Wenn der Höchstleistungscomputer auf ein Problem stößt, das er nicht lösen kann, schickt er es an den Quantencomputer, erhält das Ergebnis und setzt seine Berechnung fort. Das ist ein Forschungsthema, in das wir derzeit investieren – damit Europa künftig auf diesem Gebiet führend sein kann.

Haben Sie noch andere Schwerpunkte?

Ein wichtiger Pfeiler unserer Arbeit ist die allgemeine und berufliche Bildung. Dies ist auch ein Bereich, der in Europa bisher nicht ausreichend gefördert wurde. Deshalb investieren wir viel Geld in Hochschulprogramme, etwa in einen europaweiten Masterstudiengang für Hochleistungsrechnen. Da arbeiten wir mit mehreren Universitäten zusammen, unter Führung der Uni Luxemburg. Ziel ist es, die nächste Generation von europäischen Experten im Supercomputing auszubilden. Und wir bauen ein Netzwerk für nationale Kompetenzzentren auf, um das Wissen über die Technologie und ihre Anwendung zu erweitern. Hier ist die Arbeit des HLRS sehr hilfreich. Die Forscher dort haben bei mehreren unserer Aktivitäten die Führung übernommen – auch bei der Zusammenarbeit mit der Industrie. Das HLRS hat in diesem Bereich in Deutschland viel Erfahrung gesammelt.

Wie wichtig ist die Kooperation mit der Industrie?

Ich bin davon überzeugt, dass es viele Industrieunternehmen gibt, die keine Vorstellung davon haben, was sie erreichen könnten, wenn sie genügend Rechenleistung hätten. Wir hoffen, sie zur Zusammenarbeit mit Höchstleistungsrechenzentren zu ermutigen und ihnen zu zeigen, welche Ergebnisse erzielt werden können. Dies könnte in der Zukunft zu vielen neuen und nützlichen Anwendungen führen. ■

»Heute stehen zwei unserer europäischen Superrechner unter den ersten fünf der weltweiten Top-500-Rangliste«

•
»Ich bin überzeugt, dass viele Industrieunternehmen nicht wissen, was sie mit genügend Rechenkapazität erreichen könnten«



Moderne Techniken ermöglichen digitale After-Sales-Services während der Betriebsphase.

Wenn Roboter schneller lernen

Um die Algorithmen seiner Robotersteuerungen effizient trainieren zu können, setzt das Familienunternehmen Festo auf die Systeme des Höchstleistungsrechenzentrums Stuttgart.

von MICHAEL VOGEL

St von Industrierobotern die Rede, so taucht sofort das Bild von Schweißrobotern in der Automobilindustrie vor dem geistigen Auge auf, die völlig autark im Rohbau arbeiten. Doch das ist die Ausnahme. Viel häufiger arbeiten Mensch und Industrieroboter Hand in

Hand. Dann übernimmt der Roboter monotone Tätigkeiten oder hebt schwere Bauteile, während der Mensch die anspruchsvolleren Aufgaben erledigt.

Seit einigen Jahren gibt es eine international gültige Norm, die die direkte Zusammenarbeit von Robotern und

Menschen ermöglicht. Demnach darf ein Roboter einen Menschen sogar berühren, weil die Norm festlegt, mit welchen Kräften und Impulsen das geschehen kann, ohne den Menschen zu verletzen. Die Zeiten, in denen zwischen Menschen und Industrierobotern zwingend Absper-

gitter oder Lichtschranken waren, sind vorbei. Vielmehr soll der Roboter nun den Menschen und dessen Intentionen verstehen: Wohin bewegt sich eine Person als nächstes? Und wonach greift sie?

Hilfe durch Künstliche Intelligenz

Auch Festo macht sich die neuen technischen Möglichkeiten zunutze. Das Esslinger Unternehmen hat sich auf Fabrik- und Prozessautomatisierung spezialisiert, zum Beispiel auf Lösungen zum Greifen, Bewegen und Positionieren von Teilen oder Baugruppen. „Dabei setzen wir für die Steuerung unserer Roboter zunehmend auf Künstliche Intelligenz“, sagt Jan Seyler, Leiter der Abteilung Advanced Development Analytics and Control.

Mit Unterstützung der Künstlichen Intelligenz (KI) lassen sich Automatisierungslösungen maßgeschneidert an die Anforderungen von Kundenunternehmen anpassen – auch nachträglich, zum Beispiel wenn sich Abläufe verändern. Gleichzeitig sorgen solche Algorithmen dafür, dass das Zusammenspiel zwischen Mensch und Roboter reibungslos funktioniert. Reibungslos heißt: Ein Roboter soll nicht einfach nur in der Bewegung stoppen, wenn ihm eine Person zu nahe kommt. Vielmehr soll er ausweichen und seiner Aufgabe weiter nachgehen.

Der Einsatz von KI bedeutet immer auch, einen Algorithmus trainieren zu müssen. Festo macht das unter anderem mit dem sogenannten Verstärkungslernen. Dabei bekommt der Algorithmus Daten vorgesetzt, aus denen er selbstständig eine Strategie ableiten muss, um seine Aufgabe zu erledigen. Während er seine Strategie entwickelt, bekommt er immer wieder Feedback, ob sie gut oder schlecht ist. Nach und nach passt der Algorithmus dadurch seine Strategie an, um immer mehr positives Feedback zu bekommen. Kinder lernen ähnlich.

Viele Varianten durchspielen

„Um unsere Roboter zu trainieren, nutzen wir Daten aus Simulationen und aus Videoaufnahmen von arbeitenden Robotern“, erklärt Seyler. In den Simulationen lassen sich leicht sehr viele Varianten von Problemen durchspielen, mit denen ein Roboter in einer realen Umgebung konfrontiert sein kann. Aber eine Simu-



Tools für Auslegung und Simulation von Produkten sind online verfügbar.

lation ist nie perfekt, sondern immer nur eine Annäherung an die Wirklichkeit. Deshalb sind für das Training des Algorithmus auch Videoaufnahmen von echten Robotern wichtig. „Wie das Verhältnis zwischen diesen beiden Kategorien von Trainingsdaten ausfällt, hängt stark vom spezifischen Anwendungsfall ab“, stellt Seyler fest. „Aber ein Verhältnis von 3:1 zwischen Simulations- und Videostreams ist schon realistisch.“

So oder so hat es Festo also mit sehr großen Datenmengen zu tun. Da kommen schnell 70 bis 100 Terabyte zusammen. „Das ist der Grund, warum wir die Kapazitäten des HLRS für das Basistraining unserer Algorithmen nutzen“, so Seyler. Es geht dabei nicht um die schiere Rechenleistung an sich, sondern um die schnelle Bereitstellung und parallele Verarbeitung der Festo-Daten, um möglichst rasch aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen. „Wir haben dazu mit dem HLRS gemeinsam unsere Software auf den größeren Rechner angepasst und einen sicheren Workflow für die Daten

etabliert“, sagt Seyler. Es ist nicht das erste gemeinsame Projekt. Festo arbeitet bereits seit ungefähr zweieinhalb Jahren mit dem Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart zusammen.

In Summe dauerte das Basistraining zwei Wochen. Der trainierte Algorithmus lässt sich nun relativ rasch an spezifische Anwendungssituationen anpassen, wenn zum Beispiel ein anderes Robotermodell zum Einsatz kommt oder sich andere Objekte in der Umgebung befinden. „Das erforderliche Nachtrainieren dauert dann nur noch drei Tage“, freut sich Seyler. „Das können wir auf unseren eigenen Rechnern machen, oder sogar unsere Kundenunternehmen auf ihren Rechnern.“

Festo setzt den trainierten Roboter derzeit im Innovationsprojekt eines Kundenunternehmens ein. Bei diesem Projekt muss der Roboter an einem realen Industriearbeitsplatz eine schwere Last heben. „Im Verlauf des Jahres werden der Algorithmus und unsere bislang gewonnenen Erkenntnisse auch in unsere weiteren Produkte einfließen“, kündigt Seyler an. ■

Digitale Zwillinge in der Kultur

Das HLRS ist ein wissenschaftlicher Hotspot für Visualisierung und virtuelle Realität. Diese Expertise will das Media Solution Center Baden Württemberg für Kunst- und Kulturschaffende nutzbar machen, um kreative Synergien zu schaffen.

von THOMAS BRANDSTETTER

Im Zuge des rasanten technologischen Fortschritts und der allgegenwärtigen Digitalisierung kommt mit der E-Culture ein neuer Kulturzweig auf den Weg. Er entsteht aus der Verbindung von Wissenschaft und Kunst und nutzt dabei auf kreative Weise die neuen Möglichkeiten, die ihr die Weiterentwicklungen der Informations- und Kommunikationstechnologien bieten. Über die Produktion von Animationsfilmen und Computerspielen hinaus ergibt sich daraus auch das Potenzial, Theaterbühnen wie dem Schlosstheater Ludwigsburg oder der Staatsoper Stuttgart neues Leben einzuhauchen – oder sie in Form eines digitalen Zwillings gleich ganz in die virtuelle Realität zu verlagern.

Das HLRS hat das Media Solution Center (MSC) Baden Württemberg 2018 gemeinsam mit der Hochschule der Medien und dem Zentrum für Kunst und Medien (ZKM) in Karlsruhe gegründet, um sich mit der Kultur- und Kreativwirtschaft zu vernetzen. Dabei wird es vom Landesministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst gefördert. „Es ist bezeichnend, dass wir hier in Baden-Württemberg Wissenschaft, Forschung

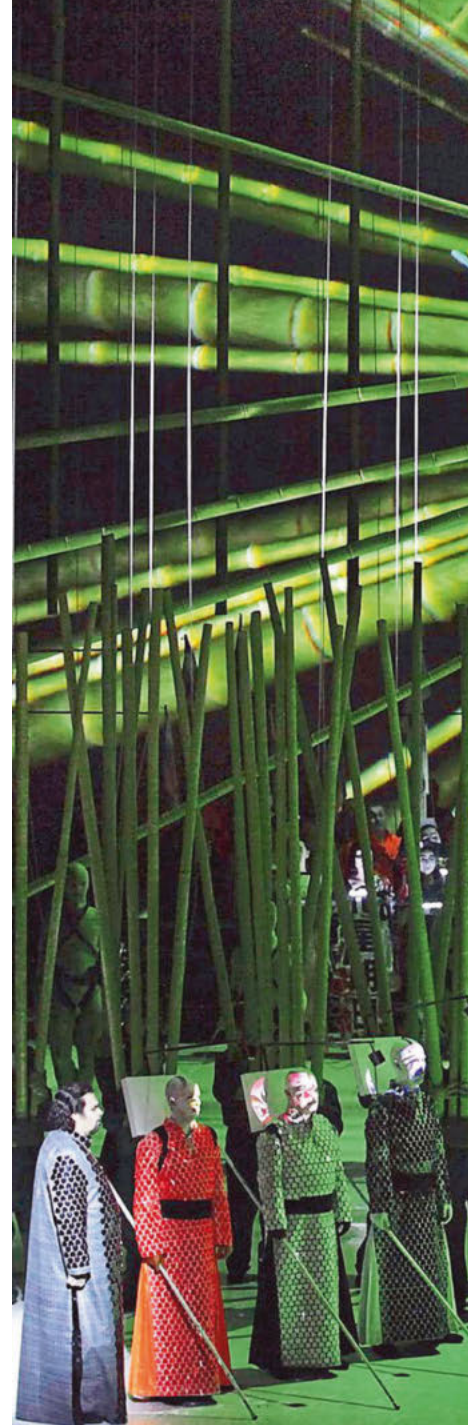
und Kunst in einem Ministerium haben“, sagt MSC-Geschäftsführer Matthias Hauser. „Das macht deutlich, dass wir in ein neues Zeitalter kommen, in der Kultur- und Kreativwirtschaft die Wissenschaft immer mehr in die Gesellschaft tragen.“ In seiner Vision von E-Culture arbeiten Wissenschaftler und Künstler vom ersten Tag eines neuen Projektes auf Augenhöhe zusammen. „Man kann heutzutage Wissenschafts- und Kulturthemen nicht mehr einzeln betrachten, sondern muss immer den Gesamtkontext sehen“, ist Hauser überzeugt.

Neues Leben fürs historische Theater

Ein aktuelles Beispiel für ein solches interdisziplinäres Projekt ist die Digitalisierung des Schlosstheaters Ludwigsburg. „Ziel ist es einerseits, den historischen Ist-Zustand in Form eines digitalen Zwillings festzuhalten“, erklärt Hauser. Schließlich verfügt das historische Theater über die älteste noch funktionstüchtige Bühnenmaschinerie der Welt. Sie erlaubt es seit dem 18. Jahrhundert, mit einer raffinierten Konstruktion aus Holz und Seilen die gesamte Bühnentechnik per Muskelkraft zu bedienen.

„Andererseits wollen wir in der digitalen Version auch ausprobieren, wie wir dem Publikum neue Seh- und Hörerlebnisse bieten können“, sagt Hauser. „Auf diese Weise können wir dieses historische Gebäude mit neuem Leben füllen, ohne es zu gefährden.“

Die technische Leitung für die Erstellung des digitalen Zwillings liegt bei der Abteilung für Visualisierung am HLRS. „Dabei geht es um deutlich mehr als um ein einfaches 3D Modell“, sagt Abteilungsleiter Uwe Wössner. „Auch Funktionalität und Simulationen gehören da-





Modernste digitale Technologien machen Bühnenauftritte zum Spektakel.

zu.“ Als Grundlage dafür haben Wössner und sein Team zunächst mithilfe eines Laserscanners den gesamten Innenraum des Gebäudes millimetergenau vermessen. Das Gerät erfasst automatisch in jede Raumrichtung den Abstand zum nächsten Objekt und generiert dabei pro Scan über 40 Millionen Messpunkte. Um damit auch wirklich alle Ecken und Winkel abzubilden, mussten die Experten des HLRS den Scanner an 50 verschiedenen Stellen positionieren und die einzelnen Scans im Nachhinein zu einem kompletten Modell zusammensetzen.

In einem nächsten Schritt haben die Wissenschaftler schließlich noch die gesamte Bühnenmechanik simuliert. So gibt es in Ludwigsburg Bühnenaufbauten, die sich auf- und abklappen lassen, austauschbare Seitenwände sowie einen Wolkenwagen, der es erlaubt, Schauspieler aus den Wolken herabsteigen und wieder hochfahren zu lassen. Und weil zur Gründungszeit des Theaters keine geeigneten Motoren zur Verfügung standen, mussten komplexe Mechaniken alle auftretenden Kräfte mit Gegengewichten ausgleichen. Dadurch war es auch einer

einzelnen Person in einer Art Hamster-
rad möglich, die Mechanik anzutreiben.
„Das alles haben wir digital nachgebil-
det, damit es sich auch in unserem digi-
talen Zwilling entsprechend bewegen
lässt“, berichtet Wössner.

Alte Berichte und Simulationen

Da es von dem historischen Theater nur sehr unvollständige Pläne gibt, mussten sich die Wissenschaftler bei der Rekonstruktion der Bühnenmechanik auf Beschreibungen der Theaterstücke beziehen, die dort gespielt wurden. „Um aber

Details wie die Durchmesser der Seile zu dimensionieren, haben wir auch mechanische Simulationen durchgeführt“, berichtet Wössner. „Unser digitaler Zwilling schaut also nicht nur echt aus, sondern basiert auch auf physikalischen Gleichungen.“ Das resultierende Modell ist auch die Grundlage für eine Zusammenarbeit mit Literaturwissenschaftlern, die damit mehr über Bühnenstücke erfahren wollen, die sonst nur als Texte zur Verfügung stehen. „Mit dem digitalen Zwilling können wir gemeinsam Szenen virtuell nachstellen und dann diskutieren, wie der Text tatsächlich gemeint war und wie die Zuschauer das Stück wahrgenommen haben“, sagt Wössner.

Parallel zum Schlosstheater Ludwigsburg begleiten Wössner und Hauser auch den Umbau des Staatstheaters Stuttgart mit einem digitalen Zwilling. „In Stuttgart haben wir praktisch den gesamten Innenraum der Staatsoper eingescannt“, sagt MSC-Geschäftsführer Hauser. „Das ist unter anderem interessant für die Bühnenbildner, weil sie ihre Kreationen

nicht gleich bauen müssen, sondern sie zunächst am Computer erstellen und ausprobieren können.“ Dabei setzen Experten auf Anwendungen der sogenannten Augmented Reality, die die Realität vor Ort im Theater mit virtuellen Bildern überlagert.

Zu diesem Zweck haben die Techniker der Abteilung für Visualisierung in der

Ein transparenter Bildschirm in der Beleuchterkabine

Beleuchterkabine, die sich im hinteren Opernbereich über den Zuschauerrängen befindet, einen transparenten Bildschirm aufgebaut. Beim Blick durch dieses Display hinunter auf die Bühne erscheinen die virtuellen Bildinhalte im Sichtfeld des Betrachters. Damit die Perspektive exakt stimmt, erfasst ein optisches Messsystem auf den Millimeter

genau die Position der Augen. So kann der Bühnenbildner frei experimentieren und beispielsweise das Bühnenbild verschieben sowie Teile davon nach Belieben einfügen oder wegnehmen.

Solche digitalen Techniken sind nicht nur billiger und verschlanken die Produktionsabläufe. Im Theater ist zudem gerade die Bühnenzeit oft ein limitierender Faktor. Schließlich laufen in der Regel gleich mehrere Produktionen parallel und jede davon will geprobt und für den Abend vorbereitet werden, weshalb die Bühne oft belegt ist. Anstatt sich also in der realen Welt dort zu treffen und neue Stücke zu planen, können Bühnenbauer, Regisseur, Schauspieler und Kostümschneider auch in der virtuellen Welt zusammenkommen, um sich untereinander auszutauschen.

Virtuelle Treffen in der CAVE

Im einfachsten Fall tragen für so ein virtuelles Treffen alle Beteiligten VR-Brillen. Die haben aber neben den üblichen Problemen wie einem limitierten Sichtfeld, perspektivischen Verzerrungen und der daraus resultierenden Übelkeit noch ein viel tiefer reichendes Problem. „VR-Brillen sind Ein-Personen-Anwendungen“, sagt VR-Experte Wössner. „Man ist damit alleine in der virtuellen Welt, obwohl man ja eigentlich gemeinsam mit Kollegen neue Konzepte entwickeln und diskutieren will.“ Abhilfe dafür kann die CAVE des HLRs schaffen: ein Würfel mit einer Kantenlänge von 2,70 Meter, den bis zu zehn Menschen gleichzeitig betreten können, um ein und dieselbe virtuelle Welt zu erleben. Dazu werden an die Decke, den Boden und noch drei weitere Seitenwände je zwei Bilder übereinander projiziert – eines für jedes Auge.

Die Besucher tragen dabei spezielle Brillen, die ihnen ähnlich wie in einem 3D-Kino ein räumliches Bild ihrer virtuellen Umgebung vermitteln. „In der CAVE können sich die Theatermacher zum Beispiel in den virtuellen Zuschauerraum setzen, um zu sehen, von welchen Plätzen aus welche Teile der Bühne sichtbar sind“, erläutert Wössner. „Oder sie bedienen die virtuelle Bühnenmaschinerie und probieren auf diese Weise schon einmal ihren kompletten Bühnenaufbau aus.“



Realität und virtuelle Nachbildung der Bühnentechnik.



Forscher des HLRS können Kulissen und Szenen im Theater schon lange vor der Premiere in 3D planen.

Ein digitaler Zwilling taugt aber nicht bloß zum Testen der Funktionalitäten im Inneren der Stuttgarter Oper. Auch die Einbettung des gesamten Gebäudes in das Stadtbild lässt sich in der virtuellen Welt bereits vor dem gerade geplanten Umbau beurteilen. „Dazu haben wir einen großen digitalen Zwilling von Stuttgart entwickelt, der unter anderem auch die Oper mit einschließt“, stellt Wössner fest. Eine solche digitale Erfassung der Umgebung ist mittlerweile auch in der Filmindustrie ein wichtiges Instrument.

Schließlich ist eine Filmproduktion ein logistisches Großunternehmen, bei dem viele Beteiligte an mitunter sensible Orte gebracht werden müssen. Oft handelt es sich dabei um historische Stätten, wo die Gefahr einer Beschädigung besteht. Oder der Ort muss während der Dreharbeiten vorübergehend für Touristen und Passanten gesperrt werden, was nicht nur Unmut hervorrufen kann, sondern auch zu Mehrkosten führt. „Daher werden reale Hintergründe immer häufiger virtuell nachgebaut“, sagt Wössner.

Täuschend echt imitierte Filmkulisse

Im Grunde kommt dafür die gleiche Technik zum Einsatz wie beim digitalen Erfassen von Innenräumen – bloß, dass zusätzlich zum Laserscanner oft auch spezielle optische Kameras für realistische Farbinformationen sorgen. Sie nehmen Unmengen an normalen, zweidimensionalen Bildern in allen möglichen Raumrichtungen und aus verschiedenen Perspektiven auf. Eine Software errechnet daraus schließlich ein dreidimensionales Modell der Szenerie. „Solche Modelle können sehr komplex sein und auch dynamische Aspekte beinhalten, etwa Fahrzeuge und Leute, die sich bewegen“, erläutert Wössner. „Das Ziel ist, künftig immer mehr solcher digitalen Zwillinge von realen Orten zu haben, die man dann für Filmaufnahmen einfach aus der Konserve holen kann.“

Die virtuelle Umgebung wird dann in der Regel über große LED-Wände in der richtigen Perspektive hinter den Schauspielern eingeblendet. Dann sieht es so aus, als wären die Akteure direkt vor Ort.

Allerdings: Während es beim Film meist genügt, wenn die Bilder ansprechend aussehen, legen die Forscher des HLRS stets auch Wert auf Realitätsnähe. „Wenn wir Wasserströmungen simulieren, zum Beispiel während einer Überflutung, machen wir das immer physikalisch korrekt“, sagt Wössner. „Daneben gibt es auch bei den Visual Effects den Trend, dass die Simulationen immer realistischer werden.“

Wofür auch immer sie eingesetzt werden – visuelle Effekte erfordern hohe Rechenleistungen. Deshalb sind die Mitglieder des MSC aus der Film- und Animationsindustrie nicht nur an der digitalen Expertise des HLRS interessiert, sondern auch an den Höchstleistungsrechnern selbst. „Einen solchen Anschluss eines Solution Centers für die Kultur- und Kreativwirtschaft an ein Höchstleistungsrechenzentrum gibt es in Europa sonst nicht“, sagt Hauser. „Das ist ein Alleinstellungsmerkmal des MSC, das uns die Vernetzung zur Medien- und Filmindustrie erleichtert.“ ■

Nachdrücklich nachhaltig

Höchstleistungsrechnen kann nicht nur helfen, neue und nachhaltigere Technologien zu entwickeln. Auch durch eine Steigerung der Effizienz bei den Supercomputern selbst lässt sich ein Beitrag zu mehr Klimafreundlichkeit leisten – ein gutes Beispiel für kommerzielle Datenzentren.

von THOMAS BRANDSTETTER

Neben den üblichen Verdächtigen Konsum, Mobilität, Heizen und Ernährung ist auch der IT-Sektor längst in den Fokus des Klimaschutzes geraten. 1,4 Prozent der weltweit emittierten Treibhausgase lassen sich auf Informations- und Kommunikationstechnologie zurückführen, allen voran die großen Datenzentren von Google, Meta und Co. Doch auch wissenschaftlich genutzte Höchstleistungsrechner benötigen große Mengen an elektrischem Strom und ringen deshalb um gesellschaftliche Akzeptanz.

Die Forscher am HLRS drehen an allen zur Verfügung stehenden Schrauben, um die Nachhaltigkeit ihrer Systeme zu verbessern. Sie wollen den investierten Strom möglichst effizient in wissenschaftlichen Fortschritt ummünzen, erschließen ökologische Ressourcen für



die Versorgung ihrer Rechner und versuchen auch die unvermeidliche Abwärme noch sinnvoll zu nutzen.

Deshalb hat man am HLRS schon vor über zehn Jahren damit begonnen, sich mit Nachhaltigkeit, Energieeffizienz und der optimalen Nutzung der Rechner zu beschäftigen. „Wir haben eine Verantwortung, uns auch mit den Fragen der Energiewende zu beschäftigen“, sagt Michael Resch, der Direktor des HLRS. Zum einen habe man versucht, die Rechenkapazität des Zentrums dafür einzusetzen, die Produktion von Energie zu optimieren. So können mithilfe der komplexen Simulationen, die auf den Höchstleistungsrechnern laufen, zum Beispiel Verbrennungskraftwerke effizienter und schadstoffärmer gemacht werden. „Aber wir haben auch gesehen, dass wir im Wind- und Wasserkraftbereich mit Simulationen sehr

viel tun können, um die Energieeffizienz zu steigern“, sagt Resch.

Zudem gibt es eine Reihe von Kooperationen mit der Luft- und Raumfahrtindustrie, um etwa an optimalen Tragflächenprofilen zu arbeiten, die den Treibstoffverbrauch von Flugzeugen senken. Und bei der E-Mobilität beschäftigt man sich seit 15 Jahren mit der Simulation von Akkus für Elektrofahrzeuge, um deren Haltbarkeit und Reichweite zu erhöhen.

Doch neben der Wahl der Forschungsthemen steht auch der ökologische Fußabdruck des Rechenzentrums selbst im Fokus. „Wir wollen so schnell wie möglich klimaneutral werden“, sagt Resch. „Da geht es neben der Reduktion der CO₂-Emissionen auch darum, Energiekosten zu sparen und damit das Budget unserer Geldgeber zu entlasten.“ So habe das HLRS in den letzten zwei Jahren be-

reits eine drastische Einsparung von Energie erreicht. „Von ursprünglich veranschlagten 6,4 Megawatt elektrischer Leistung konnten wir durch unsere bisherigen Einsparmaßnahmen den Bedarf auf etwa 3,7 Megawatt senken“, stellt Resch fest. „Unsere Stromrechnung beträgt dadurch statt 7 bis 8 Millionen Euro pro Jahr nur etwa 5 Millionen.“ Für diese Bemühungen erhielt das HLRS 2020 das europäische EMAS-Zertifikat und wurde 2023 erfolgreich revalidiert.

Rechenzentren auf dem Prüfstand

In dem vom HLRS koordinierten Forschungsprojekt ENRICH, an dem unter anderem die Universität Ulm und das Institut für Energiewirtschaft und Rationale Energieanwendung der Universität Stuttgart beteiligt waren, wurden aktuelle Entwicklungen bei Rechenzentren auf ihre Ressourceneffizienz und ihr Nachhaltigkeitspotenzial hin analysiert. Ein zentraler Aspekt dabei war das optimale Zusammenspiel zwischen Programmen und Hardware, das Martin Rose, wissenschaftlicher Mitarbeiter am HLRS, im Arbeitspaket „Betrieb digitaler Infrastruktur“ untersucht hat. So lässt sich über das „Power Capping“ regulieren, wie viel elektrische Leistung die zentrale Prozessoreinheit (CPU) beim Ausführen eines Programms aufnehmen darf. „Manche Programme werden sofort langsamer, wenn man ihre Leistung reduziert“, sagt Rose. „Andere hingegen stört das kaum und man sieht am Stromzähler, wie der Computer für die gleiche Rechenleistung weniger elektrische Leistung braucht.“

In einem Rechenzentrum wie dem HLRS gibt es üblicherweise viele Nutzer aus verschiedenen wissenschaftlichen Institutionen, die ihre Programme ausführen lassen wollen. Und so wie Universitäten ihre Leistung gern in Veröffentlichungen pro Jahr messen, lassen sich wissenschaftliche Rechenzentren danach beurteilen, wie viele Kilowattstunden Strom pro Veröffentlichung aufgewendet werden müssen. In der Regel wird jedem Nutzer eine bestimmte Rechenzeit bereitgestellt. Ist sie abgelaufen, folgt die Ablösung durch das nächste Forschungsprojekt. „Wir haben es also ständig mit neuen Bedingungen zu tun“, berichtet Rose. „Jeden Monat ändert sich



Auch das begrünte Dach des HLRS zeigt den hohen Rang von Klima- und Umweltschutz.

die Zusammensetzung der Programme, die auf unseren Rechnern laufen.“

Um die Energieeffizienz eines Programms zu beurteilen, orientieren sich die Betreiber eines Rechenzentrums an Messgrößen wie der Lastverteilung, also der Verteilung der Rechenleistung auf die einzelnen Prozessorkerne eines Großrechners. Der Hauptrechner des HLRS, der Hawk, verfügt über mehr als 10.000 Prozessoren mit insgesamt über 640.000 Prozessorkernen, von denen stets mehrere gemeinsam an einer Aufgabe arbeiten. Dazu wird das Problem zunächst parallelisiert und die gesamte Rechenarbeit auf einzelne, kleine Unterprogramme aufgeteilt, die dann jeweils auf einem der Kerne laufen. „Wenn diese Verteilung ungleichmäßig ist, kann das dazu führen, dass viele Programme darauf warten müssen, bis ein einziges anderes Programm fertig ist“, erklärt Rose. „Und da das System auch in dieser Wartezeit Strom verbraucht, verschwendet es dabei sowohl Energie als auch Zeit.“

Gigantische Gleichungssysteme

Auf den Rechnern des HLRS laufen vor allem komplexe Simulationen physikalischer Vorgänge wie Strömungen von Flüssigkeiten oder Klimasimulationen. Für solche Modelle unterteilen die Wissenschaftler den Raum in kleine, dreidimensionale Segmente und stellen für jedes davon physikalische Formeln auf. Dabei sind alle Segmente miteinander gekoppelt, wodurch ein gigantisches Gleichungssystem entsteht. Um das für die parallele Berechnung auf einem Supercomputer anzupassen, zerlegen die Programmierer das Berechnungsgebiet – etwa den Raum, durch den die Flüssigkeit fließt, oder die Atmosphäre der Erde – in Substrukturen, die sich jeweils auf einem Rechenkern lösen lassen. Dabei kommuniziert jeder Prozessor über das Netzwerk mit seinen Nachbarn und tauscht die berechneten Werte aus, um zu einer Gesamtlösung zu kommen.

„Programme, die schon seit vielen Jahren in der Entwicklung sind, zeigen in der Regel eine sehr gute Lastverteilung“, stellt der HLRS-Experte fest. „Aber es gibt auch Nutzer, die sehr neue Programme laufen lassen, die noch nicht so gut optimiert sind.“ Dann könne es sich



lohnen, noch einmal etwas Arbeitszeit zu investieren, um das Programm anzupassen. Statistische Schätzungen prognostizieren ein Potenzial für Effizienzsteigerungen von ungefähr zehn Prozent. „Die meisten Nutzer reagieren positiv, wenn wir sie auf solche Mängel in ihren Simulationen aufmerksam machen“, berichtet Rose. „Schließlich haben sie ja

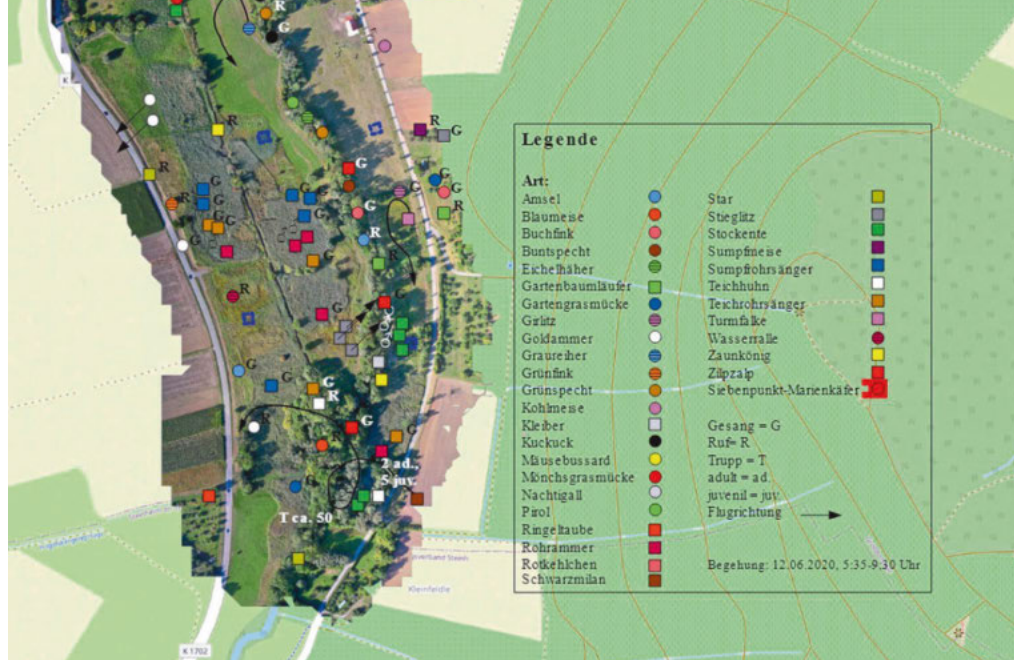
Statistische Schätzungen zeigen ein großes Potenzial zur Effizienzsteigerung

auch selbst Interesse daran, in der ihnen zur Verfügung stehenden Zeit so viel wie möglich zu rechnen.“

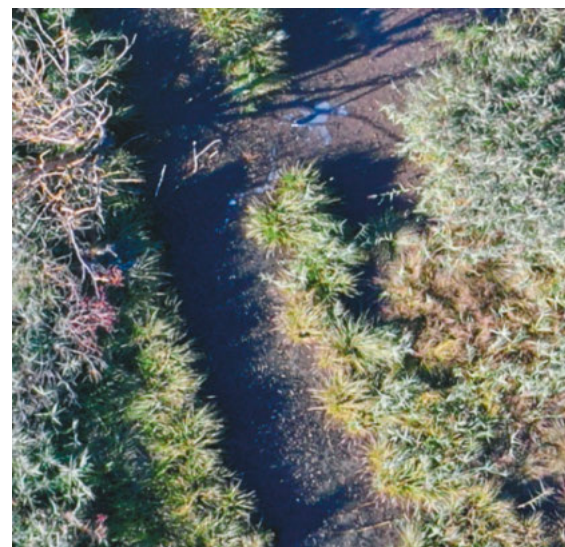
Neben der Optimierung von Programmen und Hardware kann auch der Einsatz ökologischer Ressourcen zu mehr Nachhaltigkeit führen. Zu diesem Zweck verbindet das Projekt „WindHPC“ des HLRS erstmals Computer, die sich in ei-

nem Windpark befinden, mit einem Höchstleistungsrechenzentrum. „Wenn viel Wind weht, produzieren diese Anlagen oft mehr Strom, als sie abgeben können“, erklärt Christoph Niethammer, der als wissenschaftlicher Mitarbeiter das Projekt umsetzt. Um solche Schwankungen auszugleichen, könnten dann etwa Teile einer Simulationsaufgabe vom Großrechner in Stuttgart in den Windpark verschoben werden. „Ein weiteres Vorteil von Rechnern direkt in der Windkraftanlage ist der Wegfall von Leitungsverlusten bei der Stromübertragung“, sagt Niethammer. „Würde man den Windstrom aus dem Norden hierher ans HLRS transportieren, müsste man mit fünf bis zehn Prozent Verlust rechnen.“ Zum Kühlen der Rechner würde sich der Kamineffekt in den Türmen der Windkraftanlagen anbieten. Doch dazu müssten diese erst noch umgebaut oder die Kühlung bei einem Neubau gleich berücksichtigt werden.

„Auf jeden Fall ist in den Türmen Platz vorhanden“, sagt Niethammer. „Die



Die von Experten im Gebiet eines Wasserbüffel-Weideprojekts (links) im Landkreis Ludwigsburg aufgenommenen Daten über Flora und Fauna werden laufend in die Aufnahmen von Drohnen und Satelliten integriert. Das ermöglicht sehr detaillierte Aussagen zur Veränderung der Landschaft, die durch die Tätigkeit der Büffel (rechts) bewirkt wird. Solche Veränderungen sind die Basis für mehr Biodiversität. Jede Tier- oder Pflanzenart in dem Gebiet untersuchen die Forscher mehrmals pro Jahr (Karte oben).



Grundflächen sind rund zehn Quadratmeter groß und normalerweise völlig leer“. Allerdings kann ein externer Rechner nicht die gleichen Maße haben wie sein großer Bruder im HLRS, dem etwa die Fläche einer Sporthalle zur Verfügung steht. Ein Rechner, der im Turm einer Windkraftanlage Platz findet, benötigt eine elektrische Leistung für die Stromversorgung in der Größenordnung von 100 Kilowatt – also einen Bruchteil der bis zu 6 Megawatt, die eine große Windenergieanlage erzeugt. Das Kraftwerk betreibt damit bei Bedarf nicht nur den Rechner, sondern liefert auch weiterhin Strom für die Haushalte in der Umgebung, die immer Vorrang haben.

Herausforderung Kommunikation

Das Hauptproblem bei dem Projekt ist die Kommunikation zwischen HLRS und Windpark. „Bei uns in Stuttgart stehen die Rechner alle dicht gepackt“, schildert Niethammer. „Das heißt, sie können sehr schnell miteinander kommunizieren, weil die Kabel, die die Informatio-

nen übermitteln, kurz sind.“ Bei einer mehrere Hundert Kilometer langen Leitung zum Windpark dagegen kommt es zu Verzögerungen in der Größenordnung weniger Millisekunden. „Das klingt zwar nicht nach viel, aber wenn Tausende Unterprogramme auch nur eine Millisekunde auf ein Ergebnis aus dem Windpark warten müssen, summiert sich das bereits zu mehreren Sekunden verlорner Rechenzeit“, sagt der Forscher.

Um solche Probleme zu vermeiden, sollen nur solche Berechnungen an die externen Computer ausgelagert werden, die nicht zeitkritisch sind. „Wird etwa für die Datenauswertung eine Visualisierung der Ergebnisse gebraucht, ist es nicht schlimm, wenn der Nutzer darauf eine halbe Sekunde warten muss“, sagt Niethammer. „Und die eigentlichen, komplexen Berechnungen können im Hintergrund ungestört weiterlaufen.“ Außerdem lassen sich, wenn die Struktur des Problems es erlaubt, kleinere Datensätze komplett vom Rest loslösen, um sie unabhängig auf den Windparkrechnern

zu verarbeiten. „Allerdings müssen wir immer warten, bis dort gerade ein Stromüberschuss produziert wird“, sagt Niethammer. Entscheidungsgrundlage für die Planung einer Auslagerung wird der Wetterbericht sein. „Da kommt es dann vor allem darauf an, den Workflow im Voraus gut zu planen.“ Die ersten 20 Rechner stehen schon bereit, um das Konzept zu testen, und sollen bald im Windenergiepark installiert werden.

Mit Biss und Schiss

Um Energie ganz anderer Art – bezogen auf zehn massige Wasserbüffel und die ideenreichen Initiatoren eines Weideprojekts im Bottwartal bei Großbottwar – geht es in einem Projekt zum ökologischen Weidemanagement. Bei dem Projekt im Landkreis Ludwigsburg werden



Die Computer am HLRS werden mit Wasser gekühlt, das die Anlage durchströmt und beim Rechnen produzierte Wärme wegbefördert. Dazu muss das Kühlwasser eine gewisse Vorlauftemperatur haben. Ein digitaler Zwilling hilft, den Energieaufwand dafür zu minimieren. Mit der Abwärme lassen sich Gebäude heizen.

durch „Biss und Schiss“ Strukturen zur biologischen Vielfalt geschaffen. Denn man hat erkannt, dass es neuer – aber eigentlich alter, wenn auch vielerorts verschwundener – Methoden des Landschaftsmanagements bedarf, um die für die biologische Vielfalt wichtige Nahrungskette wieder aufzubauen. Wie verändern die Tiere durch ihr Weiden und das sogenannte Suhlen die Landschaft? Welche Kleinstrukturen entstehen und geben dem großen Ganzen ein vielfältiges, ökologisches Mosaik? Solche Fragen beantwortet ein Team des HLRS unter Leitung von Uwe Wössner. Daneben betreiben die Wissenschaftler Artenschutzmonitoring sowie eine Dokumentation und Simulation der Landschaft.

Dieser Einsatz für den Naturschutz zeigt die Breite der Palette an Aufgaben, denen sich die Forscher am HLRS stellen. Die Rechner, die sie dafür nutzen, benötigen enorm viel Energie: Sie entspricht etwa der Energie des elektrischen Stroms, den eine Stadt mit 18.000 Einwohnern verbraucht. Und die Computer verwandeln sie letztlich komplett in Wärme, die abgeführt werden muss. Dennoch bleibt die Frage, wie viel die Energie für die

Wärmeabfuhr – die Kühlung der Rechner – zusätzlich kostet. Und ob man diese Wärme nicht sinnvoll nutzen kann.

Ohne zusätzlichen Energieaufwand fließt Wärme immer von warm nach kalt. „Um die Wärme also aus dem Rechenzentrum herauszubekommen, sollte die Temperatur des Kühlwassers höher sein als die Außentemperatur“, erklärt Norbert Conrad, stellvertretender Direktor des HLRS. Er ist zuständig für das Projekt

Für eine freie Kühlung wird fast kein elektrischer Strom benötigt

„DEGREE“, in dem ein digitaler Zwilling des gesamten Kühlsystems des Rechenzentrums entwickelt wird, um auch hier die Energieeffizienz zu verbessern. „Früher wurde das fast ausschließlich mit Kältemaschinen erreicht – im Grunde riesigen Kältschränken, die die Wärme nach außen pumpen“, berichtet Conrad.

Allerdings: So eine Kältemaschine benötigt für jede Kilowattstunde an Ener-

gie, die sie abtransportiert, etwa eine viertel bis eine Drittel Kilowattstunde Strom. Freie Kühlung dagegen, bei der die Temperatur des Kühlwassers von vornherein hoch genug ist, um die Wärme direkt an die Umgebung abzugeben, benötigt fast gar keinen Strom. „Unser Ziel ist deshalb, möglichst warmes Kühlwasser zu haben und möglichst viel an freier Kühlung zu machen“, sagt Conrad.

Für eine effiziente freie Kühlung sollten die Rechner also bei möglichst hoher Temperatur arbeiten. Andererseits können sie umso schneller sein, je besser sie gekühlt sind, weil sich die Abwärme mit kaltem Wasser rascher aus dem System ziehen lässt und die Prozessoren nicht so schnell überhitzen. „Die Kühlung ist effizient, wenn die Kühlwassertemperatur hoch ist. Der Rechner dagegen ist effizient, wenn sie niedrig ist“, fasst Conrad das Dilemma zusammen. „Deshalb haben wir einen digitalen Zwilling entwickelt, der unser gesamtes Kühlsystem simuliert.“ Die wichtigsten Einflussfaktoren dabei sind die Außentemperatur und der aktuelle Betriebszustand des Rechners – also die Aufgaben, an denen er arbeitet. „Der digitale Zwilling sagt uns dann, wie



Ziel der HLRS-Forscher ist es, beim Rechnen unterm Strich möglichst wenig Energie zu verbrauchen.

wir die Kühlung betreiben müssen, um ihren Energiebedarf zu minimieren.“

Doch effiziente Kühlung ist nur eine Sache. Noch besser ist es, die unvermeidliche Abwärme sinnvoll zu nutzen. „Aktuell nutzen wir die Wärme für unsere eigene Gebäudeheizung“, sagt Conrad. „Allerdings brauchen wir dafür nur etwa 100 Kilowatt, während der Rechner 3 Megawatt abgibt, also das 30-Fache.“ Andere Gebäude am Uni-Campus sind älter und deshalb oft noch auf höhere Heizungstemperaturen ausgelegt. Dort braucht es Wärmepumpen, die die Temperatur des Kühlwassers anheben. Allerdings werden Gebäude auch laufend modernisiert oder neu gebaut und lassen sich dann auch energiesparend direkt mit dem Kühlwasser des Rechenzentrums beheizen.

Superrechner beheizen die Universität
Umgekehrt wird wohl schon die nächste Generation von Rechnern am HLRS mit wärmerem Kühlwasser laufen, weil die Computer es näher an die Wärmequellen im Chip heranführen. Das reduziert den Wärmewiderstand, und das Wasser kann trotz der geringeren Temperaturdifferenz zum Chip dieselbe Kühlleistung entfal-

ten. „Beide Entwicklungen laufen gemeinsam in die richtige Richtung“, freut sich Norbert Conrad. „Deshalb gehen wir davon aus, dass wir schon ab 2027 unsere gesamte Abwärme nutzen werden, um die Universität Stuttgart zu beheizen.“ Im Winter soll so etwa die Hälfte der notwendigen Heizenergie aufgebracht werden. Und auch im Sommer gibt es etliche Systeme in den Labors und Werkstätten, die Wärme brauchen. Dieser Bedarf sollte sich mit der Abwärme des Supercomputers vollständig decken lassen.

Zurzeit ist der digitale Zwilling zur Optimierung des Kühlsystems noch speziell auf die Anforderungen des HLRS ausgelegt. Doch da andere Rechenzentren zwar andere Systeme nutzen, aber die elementare Physik dahinter stets dieselbe ist, soll die Simulation verallgemeinert werden, um auch anderorts für mehr Effizienz zu sorgen. „Als Höchstleistungsrechenzentrum sind wir Leuchttürme und haben damit eine Signalfunktion, von der auch industrielle Zentren profitieren können“, sagt HLRS-Direktor Michael Resch. „Wir jedenfalls wollen unsere Vorbildfunktion in puncto Energieeffizienz wahrnehmen.“ ■

Impressum

DIGITALE ZWILLINGE
Eine Sonderpublikation von *bild der wissenschaft* in Kooperation mit dem Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS)

ERSCHEINUNGSTERMIN:
Juni 2023 (Beilage in bdw 7/2023)

HERAUSGEBERIN:
Katja Kohlhammer

VERLAG:
Konradin Medien GmbH
Ernst-Mey-Straße 8
70771 Leinfelden-Echterdingen

CHEFREDAKTION:
Andrea Stegemann

PROJEKTLEITUNG:
Ralf Butscher

GRAFISCHE GESTALTUNG:
Ricardo Rio Ribeiro Martins

AUTOREN:
Dr. Thomas Brandstetter, Michael Vogel

FOTOGRAFIE:
Silicya Roth

BILDREDAKTION:
Sandra Hendreich

REDAKTION HLRS:
Dr. Karin Blessing, Sophia Viktoria Honisch,
Christopher Williams

VERTRIEB:
Kosta Poullos

DRUCK:
Konradin Druck,
Kohlhammerstraße 1–15
70771 Leinfelden-Echterdingen

Weitere Exemplare von
DIGITALE ZWILLINGE
können Sie anfordern bei:
Leserservice *bild der wissenschaft*
Telefon: +49 711 7252-201
Fax: +49 711 7252-399
E-Mail: bdw@zenit-presse.de

Bildnachweise

Titel: HLRS; S. 2/3: imago images/Arnulf Hettrich; S. 4–6: Porsche; S. 7: Ricardo Martins; S. 14/15: picture alliance/dpa/Marjan Murat; S. 19: HLRS; S. 20: Simon Sommer für das HLRS; S. 22: EuroHPC JU; S. 24/25: Festo; S. 27: imago stock & people; S. 28, 30, 32: HLRS; S. 33: OpenStreetMap (wasserbueffel.hlrs.de); S. 35: HLRS; alle anderen Bilder: Silicya Roth für bdw.

INFOS

Mehr Infos zum HLRS, seinen Angeboten und Forschungsthemen finden Sie unter:
www.hlrs.de

Wir würden uns freuen, wenn Sie sich ein paar Minuten Zeit nehmen würden für eine kleine Umfrage zu diesem Heft – online unter:
hier.pro/Umfrage_HLRS



HLRS

Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart

Das HLRS wurde **1996** als erstes Bundeshöchstleistungsrechenzentrum in Deutschland gegründet.

Die Einrichtung bietet **Rechenressourcen** und **Dienstleistungen** für die Industrie, Wissenschaft und Behörden.

Mehr als **100 Forscher** sind am HLRS tätig.

Das HLRS hat ein umfassendes **Aus- und Weiterbildungsprogramm** zum Supercomputing für Wissenschaft und Industrie.

Institutionelle Zugehörigkeit:



Universität Stuttgart



Finanzierung von Hawk bereitgestellt durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST

Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS)

Universität Stuttgart, Nobelstraße 19

70569 Stuttgart, Deutschland

Tel: +49 711 685-87269

Fax: +49 711 685-87209

Email: info@hlrs.de

Web: www.hlrs.de



www.blauer-engel.de/uz161

Das HLRS wurde für sein Umwelt- und Energiemanagement mit dem Eco Management and Audit Scheme (EMAS) und dem Umweltzeichen Blauer Engel ausgezeichnet.

