

Plattentektonik im Supercomputer

Ein neues Computermodell ermöglicht, die Strömungen im Erdmantel und die daraus resultierenden Plattenbewegungen so detailliert und wirklichkeitsgetreu wie nie zuvor nachzuvollziehen. Dazu passt es seine Auflösung variabel an die jeweiligen geologischen Strukturen an.

VON GEORG STADLER, CARSTEN BURSTEDDE UND MICHAEL GURNIS

Wie Puzzleteile passen die Atlantik- und Südamerikas und Afrikas auf der Weltkarte zueinander. Die beiden Kontinente sind jedoch tausende Kilometer voneinander entfernt. Der deutsche Wissenschaftler und Polarforscher Alfred Wegener (1880–1930) versuchte dieses irritierende Faktum 1915 mit einer Drift der Kontinente zu erklären. Daraus entwickelte sich schließlich die Theorie der Plattentektonik. Demnach besteht die äußere Schale der Erde aus etwa einem Dutzend großer und vielen kleineren Platten, die zwischen 50 und 100 Kilometer dick sind und sich gegeneinander verschieben. Sie bewegen sich dabei um einige Zentimeter pro Jahr. Unter ihnen erstreckt sich bis in 2900 Kilometer Tiefe der Erdmantel, der etwa die Hälfte des Erdradius umfasst. In ihm herrschen hohe Temperaturen und Drücke, weshalb das Gestein dort bis zu einem gewissen Grad erweicht und sich plastisch verformen, ja sogar fließen kann – ähnlich wie sehr zäher Honig.

Die Antriebsenergie für die viskosen Strömungen kommt aus dem Zerfall radioaktiver Elemente sowie aus dem Zerfall radioaktiver Elemente sowie aus dem heißen Erdkern, dessen äußerer Teil aus flüssigem Metall besteht. Ähnlich wie bei Wasser in einem Kochtopf, der von unten erwärmt wird, entwickeln sich durch die Hitze so genannte Konvektionsströmungen. Dabei steigt an einer Stelle besonders heißes und dadurch weniger dichtes Gestein bis zur Oberfläche auf, bewegt sich zur Seite, kühlt ab und sinkt an einer anderen Stelle wieder nach unten.

Dieser Kreislauf erneuert fortlaufend jene Platten der Erdschale, die sich

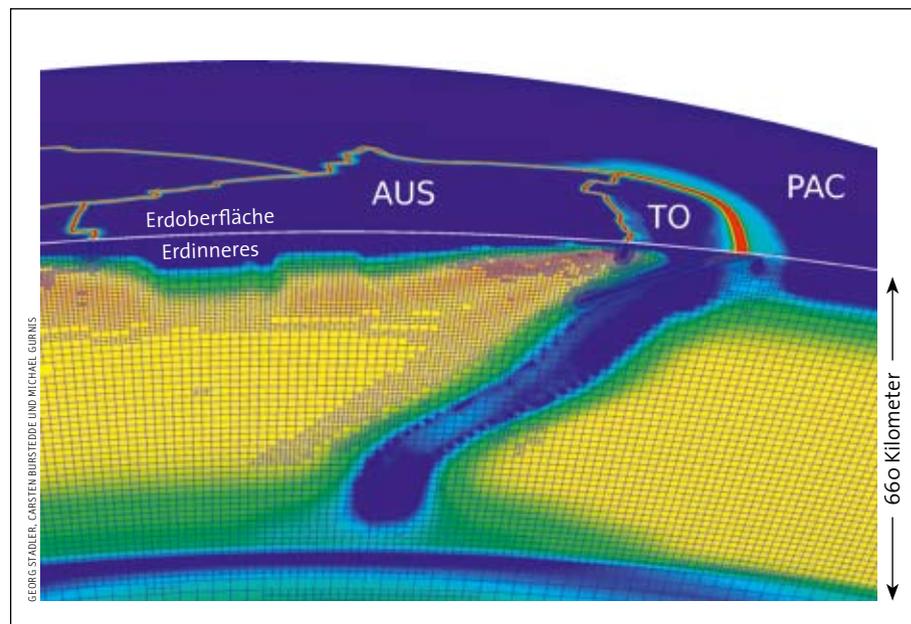
unter den Ozeanen befinden. An den mittelozeanischen Rücken steigt neues Material aus dem Erdmantel auf und erstarrt. Von dort wandern die Platten seitlich weg, kühlen dabei aus und tauchen an den so genannten Subduktionszonen – die sich oft, aber nicht immer an Kontinentalrändern befinden – wieder in den Erdmantel ab.

Mit Erdbebenwellen ins Innere der Erde blicken

Der Teil des Kreislaufs, der an der Erdoberfläche stattfindet und die tektonischen Platten einbezieht, hinterlässt direkt beobachtbare Zeugnisse – etwa in Form von Vulkanausbrüchen oder Erdbeben. Unter seinem Einfluss öffnen sich über Jahrtausende hinweg Meeresbecken oder es werden Gebirge aufgefaltet. Auch das sind direkt sichtbare Folgen der Plattenbewegung.

Die Vorgänge im tiefen Erdmantel können hingegen nicht unmittelbar beobachtet oder gemessen werden. Bohrungen reichen derzeit nur wenige Kilometer tief. Deshalb versuchen Geophysiker in Laborexperimenten abzuschätzen, wie sich Gesteine unter extrem hohen Drücken und Temperaturen verhalten. Weitere Informationen über das Innenleben unseres Planeten liefern Aufzeichnungen von Erdbeben. Dabei entstehen Wellen, deren Laufzeiten und Reflexionen Rückschlüsse auf die Temperatur und Zusammensetzung des Erdmantels zulassen.

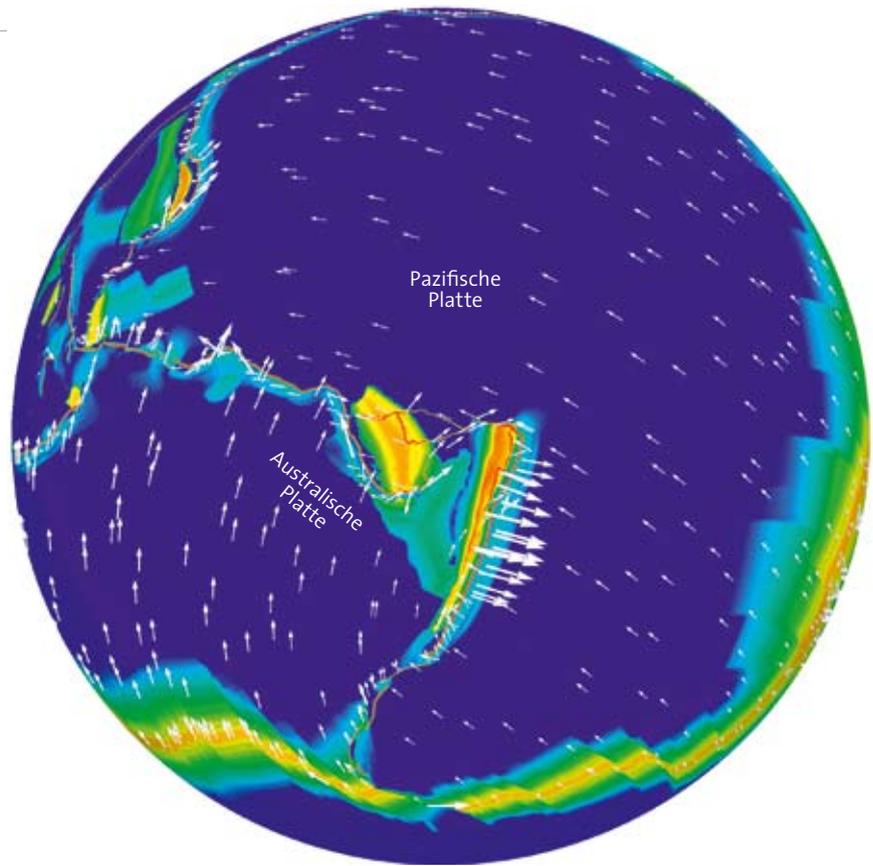
Auf der Grundlage solcher Informationen entwickeln die Forscher seit vielen Jahren Computermodelle für die Gesteinsströmungen im Mantel, die mit der Verschiebung der tektonischen Platten zusammenhängen (Spektrum der Wissenschaft 5/1999, S. 12). Diese



Das plattentektonische Modell der Autoren liefert für den pazifischen Raum das hier gezeigte Ergebnis. Farben illustrieren die Viskosität des Gesteins in zehn Kilometer Tiefe. Die Richtung und Geschwindigkeit der berechneten Plattendrift ist durch die Orientierung und Länge der Pfeile angedeutet. Die Daten stimmen gut mit Satellitenbeobachtungen überein.

Modelle müssen das hochkomplexe Verhalten beschreiben, das aus den extremen Bedingungen in der Tiefe resultiert: Mehrere tausend Grad heißes Gestein steigt nach oben, während kaltes absinkt. Abgekühltes Material an der Erdoberfläche und in untergetauchten Platten ist um vieles zäher als das heiße Medium im tieferen Erdmantel. Die tektonischen Platten bewegen sich wie starre Körper, müssen aber trotzdem biegsam genug sein, um unter benachbarte Platten abtauchen zu können. Außerdem ändert sich vor allem an Plattenrändern die Viskosität des Gesteins sowie seine Bewegungsrichtung oft innerhalb weniger Kilometer.

Die »Sprache«, in der die Modelle formuliert werden, sind so genannte partielle Differenzialgleichungen. Diese mathematischen Formeln, die das Zusammenspiel der Kräfte im Erdman-



GEORG STADLER, CARSTEN BURSTEDDE UND MICHAEL GÜRNIS

tel beschreiben, sind so kompliziert, dass sich ihre Lösung nicht mit analytischen Methoden von Hand exakt angeben lässt. Man kann sie nur auf Computern mit numerischen Verfahren näherungsweise ermitteln. Die Grundlage dafür bildet ein in den Mantel gelegtes dreidimensionales Rechengitter, in dem jeder Knotenpunkt zu einer Unbekannten und einer Gleichung gehört.

Diese Gleichungen sind miteinander gekoppelt, was zu Systemen mit vielen Millionen Unbekannten führt, die nur auf großen Computern gelöst werden können. Solche Supercomputer bestehen aus Tausenden von Prozessoren, die über ein Hochleistungsnetzwerk miteinander verbunden sind.

Herkömmliche Modelle verwenden regelmäßig strukturierte Gitter. Das vereinfacht die Rechnungen, liefert jedoch an wichtigen Stellen, wie etwa Plattenrändern, oft zu ungenaue Werte. Einen Ausweg bieten adaptive Rechengitter, deren Vorteile in der Mathematik schon länger bekannt sind. Sie haben genau dort, wo hohe Genauigkeit erwünscht ist, sehr enge Maschen. Zum Ausgleich dafür entfallen Gitterpunkte an weniger wichtigen Stellen.

Dadurch vergrößert sich das Gleichungssystem insgesamt nicht. Trotzdem erschwert die variable Maschenweite seine Lösung auf Supercomputern enorm – unter anderem, weil sich die Gleichungen nicht mehr so leicht aufstellen lassen.

Hinzu kommt ein weiteres Problem: Generell kann jeder Prozessor wegen der enormen Größe des Gitters nur ei-

Raffiniert gestricktes Rechengetz

Auf diesem Schnitt durch die Erdkruste und den oberen Mantel im Südwestpazifik ist das in den Simulationen verwendete Rechengitter eingetragen. An den Plattenrändern (rote Linien) hat es eine Maschenweite von nur einem Kilometer. Dadurch lassen sich die Vorgänge an Subduktionszonen, in denen Platten sich biegen und unter andere Platten abtauchen, sehr genau simulieren. Das ist für realistische Modelle der Plattentektonik unbedingt nötig. An Stellen mit gleichförmiger Struktur, die keine hohe räumliche Auflösung erfordern, beträgt die Maschenweite dagegen 50 Kilometer. Die Viskosität des Gesteins ist farbig dargestellt und nimmt von Rot über Gelb und Grün nach Blau zu. Man sieht, wie sich der Rand der Pazifischen Platte (PAC) unter die Australische Platte (AUS) und die Tonga-Mikroplatte (TO) schiebt. Im Untergrund überdecken die äußerst dichten dunkelblauen Gitterlinien stellenweise die rote Plattengrenze und lassen sie so dunkelblau erscheinen. In einer Tiefe von etwa 660 Kilometern erhöht sich die Viskosität des Mantels sprunghaft, weil die Minerale im Gestein hier wegen des steigenden Drucks eine andere Kristallform annehmen.

nen kleinen Teil davon speichern und bearbeiten. Idealerweise sollte die Aufteilung von Speicher- und Rechenlast ausgewogen sein. Bei einem regelmäßigen Gitter lässt sich das leicht erreichen. Der Programmierer unterteilt es einfach in gleich große Raumgebiete, die er den einzelnen Prozessoren zuweist. Diese haben dann jeweils die gleiche Anzahl an Gitterpunkten zu speichern und zu bearbeiten. Verfeinert man jedoch das Gitter an einer Stelle, um die Genauigkeit zu erhöhen, müssen die zusätzlichen Knotenpunkte gleichmäßig auf andere Prozessoren verteilt werden. Das ist besonders bei Simulationen an Supercomputern mit mehreren tausend solchen Recheneinheiten eine enorme Herausforderung.

Unser interdisziplinäres Team aus angewandten Mathematikern und Geophysikern hat sich dieser Herausforderung gestellt und es in mehrjähriger Arbeit geschafft, ein Computermodell des

Die Autoren simulierten die globalen Mantelströmungen samt den daraus resultierenden Plattenbewegungen an diesem Supercomputer des Texas Advanced Computing Center der University of Texas in Austin. Das Gerät namens Ranger ist mit etwa 62000 Prozessorkernen einer der derzeit größten Parallelrechner weltweit.

gesamten Erdmantels zu erstellen, das auf adaptiven Rechengittern basiert. Dabei wird eine Gitterzelle bei Bedarf in mehrere kleinere unterteilt. Dies ist analog zur Gabelung eines Astes, weshalb Mathematiker von einer Baumstruktur sprechen. Eine solche Struktur erlaubt eine logische Anordnung der Daten, die sich effizient auf parallel arbeitende Prozessoren verteilen lässt. Mit ihrer Hilfe gelingt es, benachbarte Gitterpunkte auch auf unterschiedlichen Recheneinheiten schnell aufzufinden. Da sich der schalenförmige Erdmantel nur mit mehreren Gitterteilen abdecken lässt, die jeweils einem separaten Baum entsprechen, mussten wir zudem Algorithmen entwickeln, die über Baumgrenzen hinweg funktionieren (*Science* 329, S. 1033–1038, 2010).

Doch die Mühe hat sich gelohnt: Mit unserem Modell können wir nun die wichtigen Zonen an Plattenrändern mit einer Maschenweite unter einem Kilometer darstellen – was etwa 0,01 Prozent des Erdradius entspricht. Im unteren Mantel verwenden wir dagegen ein deutlich gröberes Gitter. Hier beträgt die Maschenweite etwa 50 Kilometer. Dadurch benötigt unser Modell insgesamt »nur« einige hundert Millionen Knotenpunkte, so dass sich unsere Gleichungssysteme auf etwa 5000 Prozessoren in einigen Stunden Rechenzeit

lösen lassen. Dagegen hätte ein regelmäßiges Gitter mit einer Maschenweite von einem Kilometer im gesamten Mantel etwa eine Billion Knotenpunkte und würde damit selbst die größten Supercomputer überfordern.

Simulation mit hoher Auflösung

Unser adaptives Gittermodell erlaubt es, die derzeit stattfindenden Strömungen im Erdmantel samt den daraus resultierenden Plattenbewegungen mit hoher räumlicher Auflösung zu simulieren. Insbesondere liefert es dabei realistische tektonische Platten, die zwar starr, aber gleichwohl biegsam genug sind, um unter andere Platten abzutauchen. Ihre simulierten Bewegungen stimmen gut mit Beobachtungsdaten überein. Das gilt sowohl für die großen Platten wie die Pazifische, die Australische und die Eurasische Platte als auch für kleinere wie die Tonga-Mikroplatte.

Außerdem liefern unsere Simulationen ein überraschendes Ergebnis. Demnach wird die Bewegungsenergie der absinkenden Platten auch noch in tieferen Bereichen des Mantels in Wärme umgewandelt und nicht, wie bisher angenommen, fast vollständig schon in den Subduktionszonen. Überdies zeigt sich, dass der untere Mantel abtauchende tektonische Platten stärker bremst, als Modelle mit niedrigerer Auflösung vermuten ließen. Dort können nämlich Kräfte direkt auf die versunkenen Reste der ehemaligen Erdschale einwirken, weil diese lange relativ starr bleiben.

Angewandte Mathematik und ultraschnelle Computer gewähren so neue Einblicke in die unzugänglichen Tiefen unseres Planeten. Jules Verne war bei seiner Schilderung der »Reise zum Mittelpunkt der Erde« noch ganz auf seine Fantasie angewiesen. Wir können eine solche Reise – wenn auch nur virtuell – heute sehr viel realistischer nachvollziehen.

Georg Stadler und **Carsten Burstedde** arbeiten im Bereich angewandte und computerorientierte Mathematik an der University of Texas in Austin. **Michael Gurnis** ist Direktor des Seismologischen Laboratoriums am California Institute of Technology in Pasadena.



MIT FRIHL. GEN. VON TEXAS ADVANCED COMPUTING CENTER (TACC) UND ADVANCED MICRO DEVICES (AMD)