

Aus den Hochschulen



- 162 Ein Meeresspiegel für alle
- 165 TUM leitet Zukunftslabor zur KI in der Erdbeobachtung
- 168 Städten beim Wachsen zusehen

Das Schwerefeld der Erde als Basis des Internationalen-Höhen-Referenz-Systems

Ein Meeresspiegel für alle

Die Höhen auf der Landkarte werden traditionell in Metern über dem Meer angegeben. Doch dieses ist nicht überall gleich hoch. Unter Leitung der Technischen Universität München (TUM) haben Forschungsgruppen ein Internationales-Höhen-Referenz-System, IHRS, entwickelt, das geodätische Messungen überall auf der Welt vergleichbar macht.



*Mithilfe von Satellitendaten kann ein hypothetischer Meeresspiegel errechnet werden.
Bild: TUM (Curioso Photography / pexels)*

Wie hoch ist der Mount Everest? 8.848 Meter? 8.844 Meter? Oder 8.850 Meter? Lange konnten sich China und Nepal nicht einigen. 2019 bestieg ein nepalesisches Vermesser-Team den höchsten Berg der Welt, im Jahr darauf ein chinesisches. Im vergangenen Dezember gaben beide Regierungen gemeinsam das Ergebnis der Neuvermessung bekannt: 8.848,86 Meter.

Dass sowohl China, als auch Nepal diesen Wert anerkennen, ist ein diplomatischer Erfolg. Möglich wurde dieser durch das Internationale-Höhen-Referenz-System, kurz IHRS, das die Geodätinnen und Geodäten für ihre Neuvermessung erstmals verwendet haben. An dessen Entwicklung waren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der TUM federführend beteiligt. Das neue Referenzsystem schafft eine allgemeingültige Höhe Null, auf die sich Vermessungen künftig beziehen können. Es ersetzt damit den traditionellen mittleren Meeresspiegel, der als Null-Niveau die Grundlage für Vermessungen und damit aller topographischen Karten war. Über die wissenschaftlichen Hintergründe, das theoretische Konzept des IHRS und die Strategie für dessen

konkrete Umsetzung berichten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der TUM gemeinsam mit internationalen Forschungsgruppen im Fachmagazin *Journal of Geodesy*.

Wenn Null nicht gleich Null ist

Der bisher verwendete mittlere Meeresspiegel hatte einen Geburtsfehler: Er war nie eine fixe Größe. Jedes Land konnte ihn mithilfe beliebiger Pegelmessstationen bestimmen und damit sein eigenes Nullniveau festlegen. So ist der offizielle Meeresspiegel in Deutschland 31 Zentimeter höher als in Italien, 50 Zentimeter höher als in Spanien und sogar 2,33 Meter höher als in Belgien, wo sich die Höhe Null auf den Niedrigwasserstand in Ostende bezieht.

Solche Unterschiede sind nicht weiter störend, wenn man topographische Karten nur zum Wandern verwendet. Eine größere Herausforderung sind die unterschiedlichen Nullniveaus für Geodätinnen und Geodäten, die – wie am Mount Everest, der zur Hälfte zu Nepal und zur anderen Hälfte zu China gehört – eine Höhe ermitteln sollen, die von allen anerkannt wird. Und richtig teuer kann es werden, wenn bei der Planung grenzüberschreitender Bauwerke wie Brücken oder Tunneln vergessen wird, die unterschiedlichen Koordinaten der Teams abzugleichen und gegebenenfalls umzurechnen. Bei der Hochrheinbrücke zwischen Deutschland und der Schweiz wurde ein solcher Fehler gerade noch rechtzeitig bemerkt und konnte in der Bauphase korrigiert werden.

Vermessung aus dem Orbit

„Die Einführung eines international gültigen Bezugssystems war längst überfällig“, erklärt die TUM-Forscherin Dr. Laura Sánchez vom Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI-TUM), die seit mehreren Jahren die Arbeitsgruppen zu theoretischen Aspekten und zur Implementierung des neuen globalen Höhenreferenzsystems in der Internationalen Assoziation für Geodäsie leitet.

Die Lösung liegt auf der Hand. Man braucht eine Nullhöhe, die für alle gilt. Im neuen Internationalen-Höhen-Referenz-System IHR5 wird definiert, wie diese berechnet werden kann: Berücksichtigt wird dabei die Form der Erde – diese ähnelt zwar einer Kugel, ist aber durch ihre Rotation an den Polen abgeplattet und am Äquator leicht ausgebeult –, sowie die ungleichmäßige Verteilung der Massen im Erdinneren beziehungsweise an der Oberfläche. Die Unregelmäßigkeiten des Schwerefeldes, die durch diese Massenverteilung verursacht werden, sind die Grundlage für die Berechnung des Höhensystems, denn Stärke und Ausrichtung der Schwerkraft bestimmen die Verteilung des Wassers in den Ozeanen. Tut man nun so, als wäre die ganze Erdkugel von Wasser bedeckt, lässt sich die Höhe eines hypothetischen Meeresspiegels und damit die Höhe Null für den gesamten Globus exakt bestimmen.

Für Bauprojekte sind selbst kleinste Abweichungen entscheidend

„Erst die Verfügbarkeit von globalen Daten aus Satellitenmissionen wie dem ESA-Erdbeobachtungssatelliten GOCE – die Abkürzung steht für Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer – hat die Realisierung des IHRS ermöglicht“, sagt Prof. Roland Pail vom TUM-Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie. Sein Team hat die GOCE-Messungen maßgeblich ausgewertet und daraus globale Modelle des Erdschwerefeldes berechnet. „Die so gewonnenen Informationen bilden die Grundlage, um mit dem neuen internationalen Höhen-Referenz-System für jeden Punkt der Erde, gleichgültig ob sich dieser auf einem Kontinent oder einem Ozean befindet, den mittleren Meeresspiegel und damit das international gültige Nullniveau zu errechnen“, erklärt Sánchez.

Müssen jetzt alle Karten neu gezeichnet werden? „So dramatisch wird es wohl nicht werden“, beteuert Sánchez. „In den Industriestaaten, wo schon seit Jahrzehnten Schweremessungen durchgeführt wurden, sind die Abweichungen gering und liegen nur im Dezimeterbereich.“ Doch wenn es beispielsweise um Bauprojekte gehe, seien selbst kleine Abweichungen ein großes Ärgernis. Daher werde sich das neue Bezugssystem schnell durchsetzen, davon ist die Forscherin überzeugt.

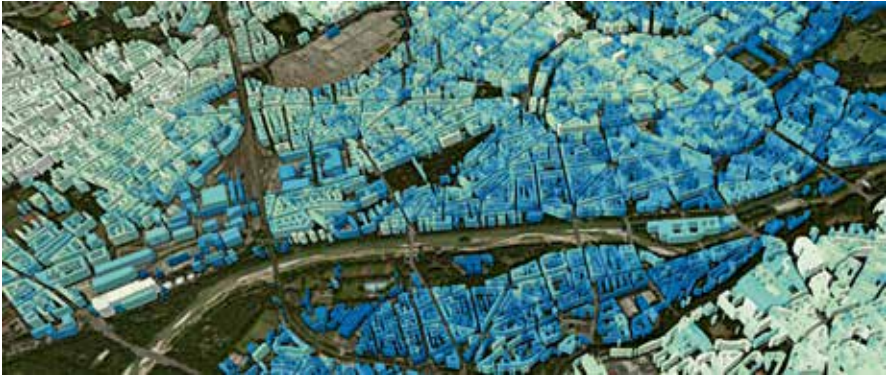
Erarbeitung und Implementierung des IHRS durch die TUM

Das Deutsche Geodätische Forschungsinstitut der Technischen Universität München (DGFI-TUM) und der Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie (APG) haben durch die Entwicklung wissenschaftlicher Methoden für die Realisierung physikalischer und geometrischer Referenzsysteme intensiv zum IHRS beigetragen. In der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) sind die beiden TUM-Einheiten an unterschiedlichen Schlüsselpositionen für die Erarbeitung und Implementierung des IHRS federführend. Speziell verfügt die TUM über starke Kompetenzen in der Bestimmung von Koordinaten durch Globale Navigations-Satellitensysteme (GNSS), der Kombination von Schwerfeldbeobachtungen zu hochgenauen Schwerfeldmodellen sowie in der Kombination von Schwerfeld- und GNSS-Daten zur Höhenbestimmung. ■■■

Bund fördert Forschung zur Künstlichen Intelligenz mit 5 Millionen Euro

TUM leitet Zukunftslabor zur KI in der Erdbeobachtung

Im Wettbewerb „Internationale Zukunftslabore Künstliche Intelligenz“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) war die Technische Universität München (TUM) erfolgreich: unter der Führung der TUM wurde das Zukunftslabor AI4EO gestartet. Gefördert mit bis zu fünf Millionen Euro werden in Zusammenarbeit u. a. mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mithilfe von Satelliten-Daten und intelligenter Big-Data-Analyse die globale Urbanisierung, die Ernährung der Weltbevölkerung sowie das Management von Naturgefahren modelliert.



Das Bild zeigt einen Ausschnitt des globalen urbanen 3D-Modells, abgeleitet primär aus TanDEM-X-Satellitendaten. Um dieses Modell für alle Städte der Welt zu erstellen, werden hoch entwickelte KI-Verfahren verwendet (Bild: Xiaoxiang Zhu, DLR/TUM)

Exzellente Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt sollen gemeinsam zu aktuellen Forschungsfragen in der Künstlichen Intelligenz arbeiten – das ist die Idee der internationalen Zukunftslabore. Das BMBF hatte dazu einen Wettbewerb ausgeschrieben. Bundesweit werden nun drei Projekte gefördert, darunter das Zukunftslabor „Artificial Intelligence for Earth Observation: Reasoning, Uncertainties, Ethics and Beyond (AI4EO)“. Es wird von der TUM geleitet, das DLR ist ein enger Forschungspartner.

Enorme Datenmengen erfordern KI-Verfahren

Wie entwickelt sich die globale Urbanisierung und wie viele Menschen leben weltweit in Slums? Wo finden erhebliche Veränderungen in der Natur statt? Um diese Fragen zu beantworten, werden immer öfter Satellitendaten genutzt. Die dabei anfallenden Datenmengen sind mittlerweile so enorm, dass die benötigten Informationen in Zukunft nur noch mit KI-Verfahren gewonnen werden können. Aber nicht nur bestimmte Phänomene können erfasst, sondern auch neue Erkenntnisse und bisher unbekannte Zusammenhänge sollen in den Daten erkannt werden. So kann die Beobachtung eines Gebiets über einen längeren Zeitraum bestimmte Veränderungen sichtbar machen, die mit politischen Entscheidungen zusammenhängen oder zu solchen führen.

Innovative Technologie führt zu ethischen Fragen

Insgesamt 27 Forscherinnen und Forscher aus 20 Organisationen in neun Ländern werden sich mit der Entwicklung von KI-Technologien für die Erdbeobachtung befassen. „Ziel des Zukunftslabors AI4EO ist es, die Spitzenposition Deutschlands in diesem Bereich zu festigen“, sagt Prof. Xiaoxiang Zhu, die Leiterin des Labors. Um dieses Ziel zu erreichen, verfolgen die Forscherinnen und Forscher einen interdisziplinären ganzheitlichen Ansatz, in dem nicht nur neue Methoden für die Erdbeobachtung entwickelt, sondern auch damit verbundene grundsätzliche Fragen bearbeitet werden, wie die Verlässlichkeit und Genauigkeit von Aussagen aus KI-Systemen.

Die Technologiefortschritte führen auch zu ethischen Fragestellungen, die ebenfalls im Zukunftslabor bearbeitet werden. Wenn Informationen öffentlich zugänglich sind, könnten sie zum Beispiel dabei helfen, Waldbrände zu verhindern, Städte nachhaltiger und lebenswerter zu gestalten oder Slums besser zu managen. Hier ist es wichtig, den Nutzen öffentlicher Daten gegen einen möglichen Missbrauch abzuwägen. Auch der Schutz der privaten Informationen ist wegen der immer höheren Auflösung der Bilder ein wichtiges Thema.

„Im neuen Zukunftslabor können wir die Stärken der TUM in der Erdbeobachtung, der Geodäsie, der Satellitentechnik, der Raumfahrtforschung, der Mathematik und der ethischen Forschungen miteinander verknüpfen und die Potentiale der Künstlichen Intelligenz gezielt zum Wohle der Menschheit einsetzen“, sagt TUM-Präsident Thomas F. Hofmann. „Ein großartiger Erfolg der synergetischen Kompetenzbündelung der im Rahmen der Hightech Agenda der Staatsregierung gegründeten neuen Fakultät Luftfahrt, Raumfahrt und Geodäsie (LRG), das Herzstück eines Space Valley in der Metropolregion München.“

Zum Zukunftslabor AI4EO an der TUM

Die Leiterin des Zukunftslabors, Prof. Dr. Xiaoxiang Zhu geleitet. Sie ist Professorin für Signalverarbeitung in der Erdbeobachtung an der Fakultät Luftfahrt, Raumfahrt und Geodäsie der TUM und leitet die Abteilung „EO Data Science“ am DLR. Forschungspartner sind Prof. Dr. Massimo Fornasier, Lehrstuhl für Angewandte Numerische Analysis, Fakultät für Mathematik Prof. Dr. Christoph Lütge, Munich Center for Technology in Society (MCTS), Institute for Ethics in Artificial Intelligence, sowie Prof. Dr. Richard Bamler, Lehrstuhl für Methodik der Fernerkundung, Fakultät Luftfahrt, Raumfahrt und Geodäsie sowie Direktor des Instituts für Methodik der Fernerkundung des DLR. Die Förderung für das Zukunftslabor AI4EO beträgt bis zu fünf Millionen Euro über drei Jahre. Die drei Zukunftslabore wurden von einer unabhängigen Jury aus insgesamt 14 Bewerbungen ausgewählt, an denen sich über 35 deutsche und mehr als 70 ausländische Forschungseinrichtungen beteiligt hatten. ■■■

Weltrekord bei der Auswertung von Satellitendaten

Städten beim Wachsen zusehen

Drei Millionen Messpunkte pro Quadratkilometer: Prof. Xiaoxiang Zhu hat mit ihrem Team einen Weltrekord bei der Auswertung von Satellitendaten aufgestellt. Dank neuer Algorithmen konnten die Forscherinnen und Forscher der Technischen Universität München (TUM) aus den Messwerten des Radarsatelliten TerraSAR-X vierdimensionale Punktwolken von Berlin, Las Vegas, Paris und Washington, D.C. erstellen. Im nächsten Schritt wollen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler alle Städte der Welt abbilden.



Mithilfe der neuen Satelliten-Tomographie können Forscher die Stadt Berlin kartieren und Deformationen und Senkungen auf den Millimeter genau erfassen. (Bild: TUM & DLR)

Weltweit wachsen die Metropolen. Nach Schätzungen der Vereinten Nationen lebt bereits heute gut die Hälfte der Erdbevölkerung in Städten, 2050 sollen es zwei Drittel sein. "Dieses Wachstum stellt hohe Anforderungen an die Sicherheit von Gebäuden und Infrastruktur, weil Schäden Menschenleben bedrohen können", sagt Xiaoxiang Zhu, Professorin für Signalverarbeitung in der Erdbeobachtung an der TUM.

Gemeinsam mit ihrem Team hat sie ein Verfahren entwickelt, mit dem sich potenzielle Gefahren frühzeitig erkennen lassen: Beispielsweise könnten Senkungen des Untergrunds zum Einsturz von Gebäuden, Brücken, Tunneln und Staudämmen führen. Mit der neuen Methode lassen sich bereits Veränderungen von einem Millimeter pro Jahr aufspüren und sichtbar machen.

Dreidimensionaler Radarblick auf die Metropolen der Welt

Die Daten für das detaillierte Bild der Städte liefert der TerraSAR-X, der genaueste zivile Radarsatellit der Welt. Seit 2007 umkreist er unseren Planeten in einer Höhe von etwa 500 Kilometern, sendet Mikrowellenimpulse zur Erde und fängt deren Echo wieder auf. "Diese Messungen ergeben zunächst einmal nur ein zweidimensionales Bild mit einer Auflösung von einem Meter", erklärt Zhu.

Die TUM kooperiert dabei mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Das DLR ist für Betrieb und Nutzung des Satelliten für wissenschaftliche Zwecke zuständig. "Dass die Aussagekraft der Bilder begrenzt ist, liegt daran, dass sich die Reflexionen verschiedener Objekte, die gleich weit vom Satelliten entfernt sind, überlagern. Dieser Effekt reduziert die dreidimensionale Welt auf ein zweidimensionales Bild!"

Mithilfe eines von ihr entwickelten Algorithmus konnte Zhu nicht nur die dritte und sogar die vierte Dimension (Zeit) rekonstruieren, sondern auch gleich einen Weltrekord aufstellen: Drei Millionen Messpunkte errechnet der Computer pro Quadratkilometer. Daraus lassen sich hochpräzise, vierdimensionale Punktwolken erstellen.

Verschiedene Blickwinkel ergeben ein genaues Bild

Der Trick dabei: Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nutzen leicht verschiedene Blickwinkel des Satelliten. Dieser überfliegt jede Region der Erde im Rhythmus von elf Tagen. Allerdings ist seine Position nicht immer exakt dieselbe. Diese Orbitvariationen von etwa 250 Metern nutzen die Forscherinnen und Forscher bei der Radartomographie aus, um die Lage jedes Punkts im dreidimensionalen Raum zu messen. Das Prinzip dieser Methodik ist dasselbe wie bei der Computertomografie, die einen Blick in den menschlichen Körper erlaubt: Verschiedene Messungen aus unterschiedlichen Richtungen werden zu einem dreidimensionalen Bild zusammengeführt.

"Da dieses Verfahren in der dritten Dimension nur eine schlechte Auflösung liefert, setzen wir zusätzlich Compressive Sensing-Methoden ein, mit denen sich die Auflösung um das 15fache verbessern lässt", sagt Zhu.

Mit den Radarwellen des TerraSAR-X können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Strukturen auf der Oberfläche sehr genau erfassen: beispielsweise die Form und Höhe von Gebäuden. Für Berlin, Las Vegas, Paris und Washington, D.C. wurden auf diese Weise hochpräzise 3D-Modelle errechnet.

Die vierte Dimension

Nachdem die verwendeten Radarbilder im Abstand von je 11 Tagen, also zu unterschiedlichen Zeiten, aufgenommen werden, lässt sich auch die zeitliche Veränderung – und damit die vierte Dimension – sichtbar machen. Das 4D-Modell, das so entsteht, zeigt kleinste Veränderungen mit einer Genauigkeit eines Bruchteils der Radarwellenlänge. So lassen sich beispielsweise die thermische Ausdehnung von Gebäuden im Sommer oder Deformationen, die durch eine Senkung des Untergrunds verursacht werden, mit einer Präzision von zirka einem Millimeter pro Jahr erfassen. Zhu: "Die Methode eignet sich, um Gefahrenpunkte aufzuspüren. Satellitentechnik kann damit einen wichtigen Beitrag dazu leisten, Gebäude und Infrastruktur in Städten sicherer zu machen."

Künftig wollen die Forscherinnen und Forscher den Metropolen sogar beim Wachsen zusehen. Im ERC Projekt "So2Sat" werden alle Ballungsgebiete der Welt kartiert und langfristig beobachtet. Schwerpunkt der Untersuchungen sind die Schwellenländer, wo innerhalb kürzester Zeit ganze Stadtteile aus dem Boden wachsen. Erstmals wollen Zhu und ihr Team mehrere verschiedene Big Data-Quellen nutzen: Messungen von Satelliten werden kombiniert mit Kartenmaterial aus Open Street Map und dem schier unbegrenzten Strom von Bildern, Texten und Aktivitätsmustern aus sozialen Netzwerken. Bei der Auswertung der gewaltigen Datenmenge werden die Forscher vom Leibniz Rechenzentrum unterstützt. ■■■