





Das neue Internationale Höhenreferenz- system (IHR5)

AUTORIN **Laura Sánchez¹** | München

[1] Technische Universität München | Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI-TUM)
Vizepräsidentin des Global Geodetic Observing System (GGOS) der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG)



Seit Ende der 1970er-Jahre wird in der internationalen Geodäsie über die Vereinheitlichung lokaler Höhensysteme diskutiert, um konsistente Höhenangaben für überregionale und globale Anwendungen bereitzustellen.

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 zur Definition und Realisierung physikalischer und geometrischer Referenzsysteme intensiv beigetragen.

In der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) sind die beiden TUM-Einheiten an unterschiedlichen Schlüsselpositionen für die Erarbeitung und Implementierung eines globalen Höhenreferenzsystems (das **International Height Reference System – IHRS**) federführend.

Speziell verfügt die TUM über starke Kompetenzen in der Bestimmung von Koordinaten durch Globale Navigationssatellitensysteme (GNSS), der Kombination von Schwerefeldbeobachtungen zu hochgenauen Schwerefeldmodellen sowie in der Kombination von Schwerefeld- und GNSS-Daten zur Höhenbestimmung.

Nachstehend wird der gegenwärtige Stand der Forschungsarbeiten für die Implementierung des IHRS zusammengefasst.

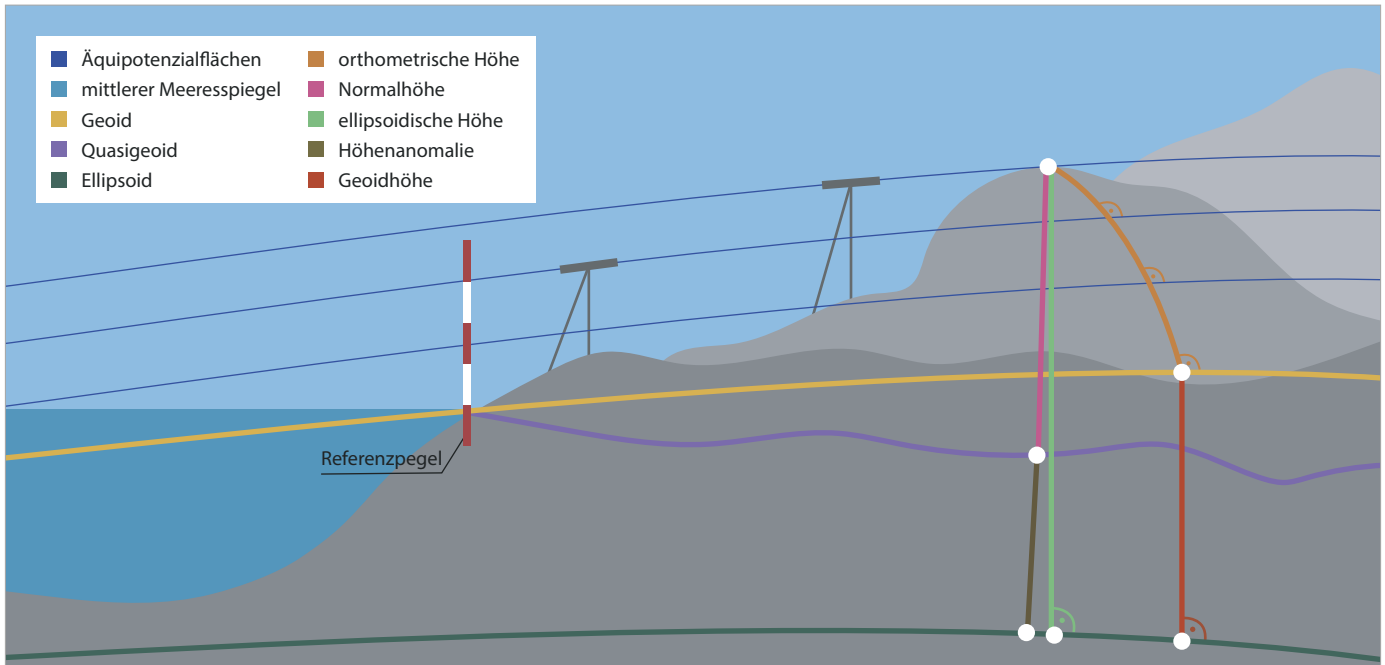


Abbildung 1 | Physikalische und geometrische Höhen und Bezugsflächen. Orthometrische Höhen (entlang der Lotlinie des Erdschwerefeldes) beziehen sich auf das Geoid, Normalhöhen (entlang der Lotlinie des ellipsoidischen Normalschwerefeldes) auf das Quasigeoid, (geometrische) ellipsoidische Höhen (entlang der Ellipsoidnormalen) auf das Ellipsoid.

GEOMETRISCHE UND PHYSIKALISCHE HÖHEN

Ein Höhensystem ist ein eindimensionales Koordinatensystem, das verwendet wird, um den metrischen Abstand (Höhe) eines Punktes über einer Bezugsfläche (Höhe null) anzugeben. Wenn die Bezugsfläche und die Höhe mit den Äquipotenzialflächen und der Lotlinie des Erdschwerefeldes verbunden sind, wird es physikalisches Höhensystem genannt, sind die Bezugsfläche und die Höhe nicht vom Erdschwerefeld abhängig, wird es als geometrisches Höhensystem bezeichnet (Abbildung 1). Im letzteren Fall ist die globale Bezugsfläche ein Referenzellipsoid und die vertikale Koordinate heißt ellipsoidische Höhe, die üblicherweise von Satellitenpositionierungsverfahren (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) abgeleitet wird. Die Bezugsfläche der meisten bestehenden physikalischen Höhensysteme ist mit dem an einem Pegel ermittelten mittleren Meeresspiegel verbunden. Da der mittlere Meeresspiegel geografisch und zeitlich variiert, können die mittleren Meeresspiegelwerte, die für die Definition der Höhe null in verschiedenen Ländern verwendet werden, Diskrepanzen von bis zu mehreren Dezimetern aufweisen.

Die traditionelle Methode zur Gewinnung physikalischer Höhen ist das geodätische Nivellement in Kombination mit schwereabhängigen Reduktionen entlang der sogenannten Vertikal- oder Nivellementsnetze. Die schwereabhängigen Reduktionen sind notwendig, um den nicht konstanten Abstand zwischen Äquipotenzialflächen aufgrund von Variationen des Erdschwerefeldes zu berücksichtigen. Wegen der Nichtparallelität der Äquipoten-

zialflächen sind die nivellierten Höhenunterschiede wegabhängig, und sie entsprechen nicht dem Unterschied der physikalischen Höhen. Für die endgültige Höhenfestlegung werden die gemessenen Höhenunterschiede wegen der Schwerefeldeffekte korrigiert und in Potenzialdifferenzen umgewandelt, die unabhängig vom Nivellementsweg sind. Die Summation der Potenzialdifferenzen zwischen dem Nullhöhenpunkt und einem beliebigen Punkt wird als geopotenzielle Kote bezeichnet, die sich bei Division durch einen Schwerewert leicht in eine metrische Höhe umrechnen lässt. Abhängig von den Schwerereduktionen werden verschiedene Arten von physikalischen Höhen unterschieden: orthometrische Höhen, Normalhöhen und dynamische Höhen. So kann die Höhe eines Punktes auf viele leicht unterschiedliche Arten bestimmt werden, von denen jede einen anderen Höhenwert für denselben Punkt ergibt (Abbildung 1).

Orthometrische und Normalhöhen sind bei der Definition und Realisierung von physikalischen Höhensystemen weit verbreitet, während dynamische Höhen hauptsächlich zur Bestimmung der Höhenkoordinate in Gewässern (z. B. großen Seen) eingesetzt werden. Die Ermittlung von ellipsoidischen Höhen hat heute dank der GNSS-Techniken viele Vorteile gegenüber den (nivellierten) physikalischen Höhen, z. B. hohe Genauigkeit über große Entfernungen, schnelle und kostengünstige Bestimmung etc. Allerdings können sie in vielen wissenschaftlichen und praktischen Anwendungen die physikalischen Höhen nicht ersetzen, da sie »geometrisch« sind und das Fließen des Wassers nicht beschreiben können. Aus diesem Grund werden physikalische Höhensysteme weiterhin benötigt, und ein geometrisches Höhensystem kann sie nicht ersetzen.

»

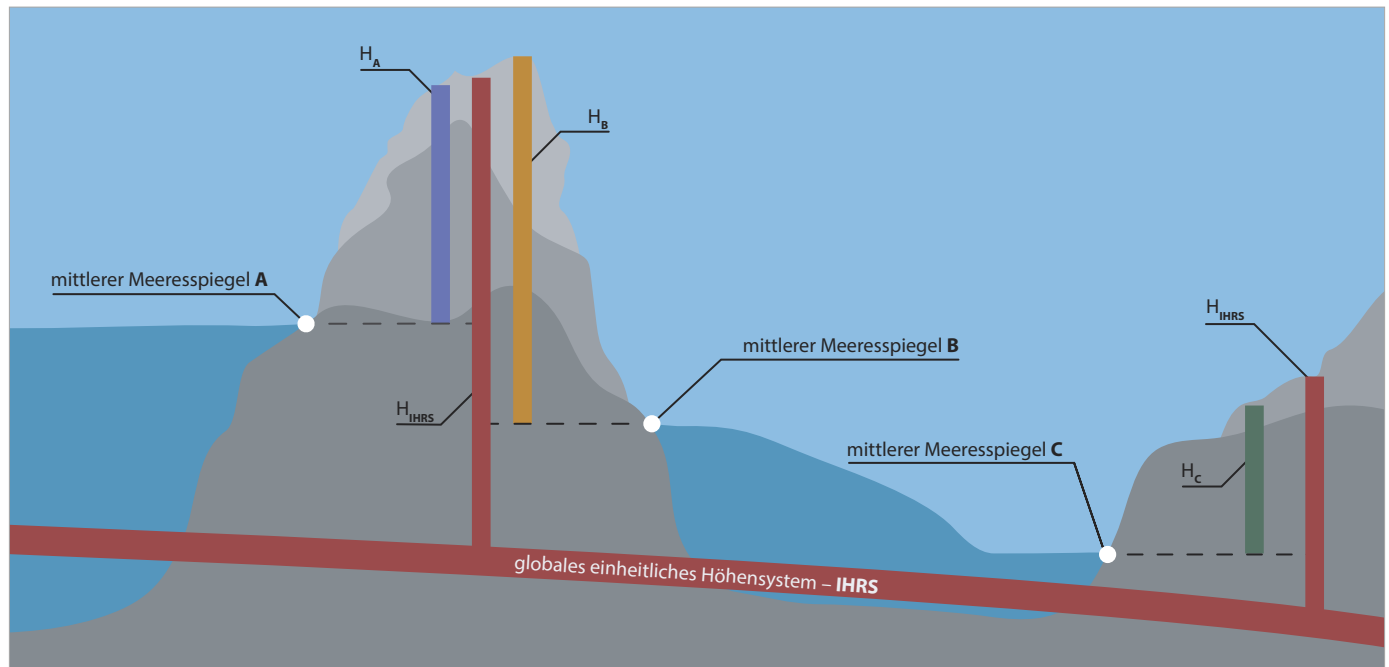


Abbildung 2 | Lokale versus globale Höhensysteme. Aufgrund geografischer und zeitlicher Variationen der Meeresoberfläche weisen lokale Nullhöhen, die mit dem mittleren Meeresspiegel verbunden sind, Diskrepanzen von bis zu mehreren Dezimetern auf. Das Ziel eines globalen, einheitlichen Höhensystems ist es, alle weltweit existierenden physikalischen Höhen auf dieselbe Bezugsfläche zu beziehen.

LOKALE HÖHENSYSTEME UND NOTWENDIGKEIT EINES GLOBAL EINHEITLICHEN HÖHENSYSTEMS

Da sich die meisten existierenden Höhensysteme auf lokale Mittelwerte des Meeresspiegels beziehen und durch nationale oder regionale Nivellementsnetze realisiert werden, die bestimmte Regionen abdecken, sind sie nur über begrenzte geografische Gebiete nutzbar. Es handelt sich also um lokale Höhensysteme. Gegenwärtig werden weltweit etwa 100 lokale Höhensysteme benutzt.

Auf nationaler Ebene gehören zu den praktischen Anwendungen und Vorteilen eines konsistenten lokalen Höhensystems u. a.:

- verbesserte Küsten- bzw. Hafenschifffahrt
- genaue Höhenmodelle für den Hochwasserschutz
- genaue Höhenmodelle für Umweltgefährdungen
- genaue Höhenmodelle für nachhaltiges Landmanagement
- genaue Modelle für Sturmfluten und Küstenerosion
- verbesserte Modelle für die Überwachung von Chemieunfällen
- verbessertes Verständnis von tektonischen Bewegungen, postglazialen Hebungen und Landabsenkungen
- verbesserte Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen etc.

Die lokalen Höhensysteme sind jedoch nicht in der Lage, eine geeignete Referenz für internationale oder globale Projekte im großen Maßstab zu liefern. Die Hauptanforderung in dieser Hinsicht ist die Einrichtung eines globalen physikalischen Höhensystems, das es ermöglicht, alle Höhen auf der ganzen Welt auf ein

und dieselbe Referenzfläche zu beziehen (Abbildung 2). Die Etablierung eines genauen, konsistenten und wohldefinierten globalen Höhensystems hat viele positive Auswirkungen, u. a.,

- um eine konsistente und genaue Referenz für die Verbindung nationaler oder regionaler Höhensysteme zu schaffen, die z. B. bei grenzüberschreitenden Bauarbeiten (Brücken, Kanälen, Tunnels etc.) wichtig sind;
- zur Beseitigung von Inkonsistenzen bei Schwerefeldanomalien und Höhen, die sich aus der Verwendung unterschiedlicher Nullhöhen ergeben;
- um Ergebnisse von geodätischen Nivellements und ozeanografischen Verfahren zur Bestimmung der Meeresoberflächenvariationen über große Entfernungen zu kombinieren;
- umfassende Betrachtung der Auswirkungen des globalen Wandels, wie z. B. Variationen des mittleren Meeresspiegels, Änderungen des Eisvolumens an den Polen, überregionale postglaziale Hebungen und Landabsenkungen etc.;
- Bereitstellung eines zuverlässigen Bezugsrahmens für die konsistente Analyse und Modellierung globaler Phänomene und Prozesse, die das Schwerefeld der Erde beeinflussen, wie z. B. die Umverteilung von Massen in Ozeanen, Kontinenten und im Erdinneren, die globale Ozeanzirkulation und im Allgemeinen alle Prozesse, die mit geophysikalischen Veränderungen verbunden sind;

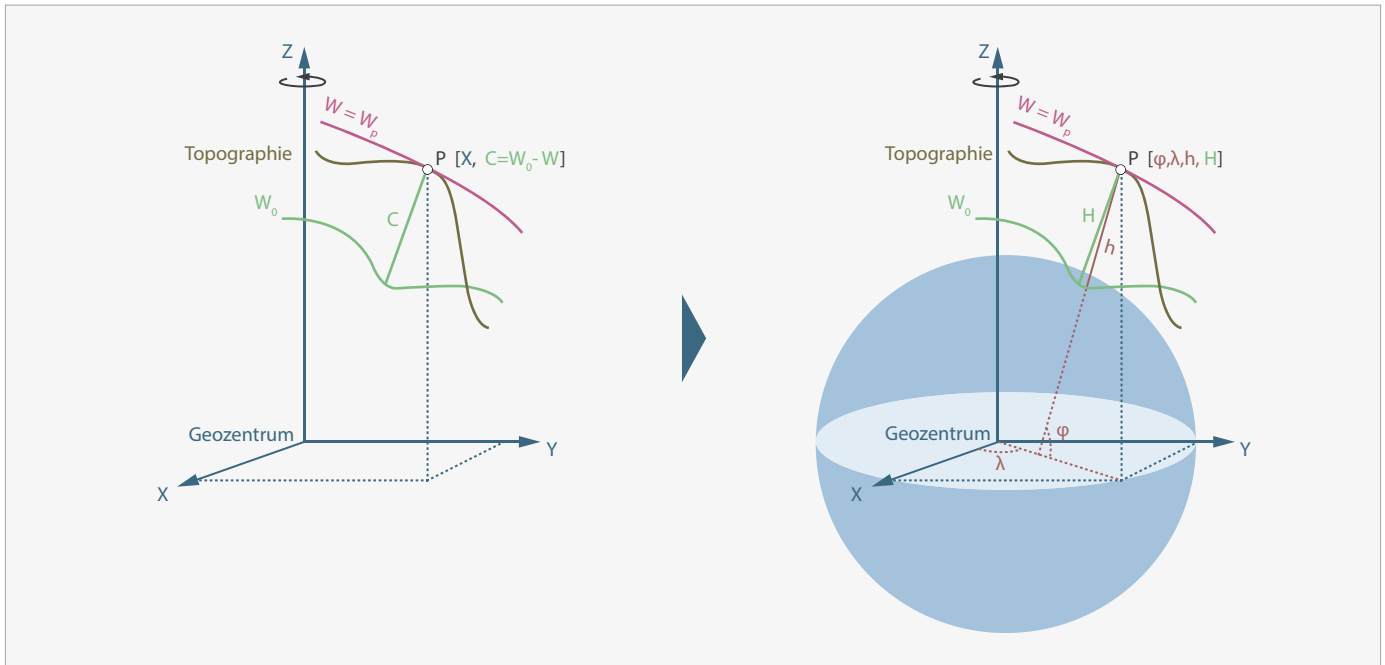


Abbildung 3 | Koordinaten des Internationalen Höhenreferenzsystems (IHR). Koordinaten von Punkten auf der Erdoberfläche sind durch Geopotenzialwerte W und geozentrische kartesische Koordinaten X gegeben (links). Für praktische Zwecke können die Positionen X in ellipsoidische Koordinaten (φ, λ, h) und die Potenzialwerte W in geopotenzielle Koten C (und weiter in physikalische Höhen H) transformiert werden (rechts), die sich auf das konventionelle globale Referenzniveau W_0 beziehen.

- die präzise Kombination von physikalischen und geometrischen Höhen zu unterstützen, um die Vorteile der Satellitengeodäsie maximal auszunutzen (z. B. Kombination von Satellitenpositionierung und Schwerfeldmodellen für eine weltweit einheitliche präzise Höhenbestimmung).

Alle diese Anwendungen erfordern eine globale Sicht auf die Erde mit Messungen nicht nur an Land, sondern auch über den Ozeanen. Die geeignete Kombination von beobachteten Höhenänderungen im Land- und Ozeanbereich muss zwingend auf einem weltweit einheitlichen Höhensystem basieren. Neben der präzisen Definition und zuverlässigen Realisierung eines globalen Höhenreferenzsystems ist es auch wichtig, den Anwendern die praktische Grundlage zu geben, lokale oder regionale Höhensysteme in das globale Höhensystem zu transformieren.

EIN EINHEITLICHES HÖHENSYSTEM FÜR ALLE LÄNDER DER ERDE

Die Internationale Assoziation für Geodäsie (IAG), als die für die Förderung der Wissenschaft der Geodäsie zuständige Organisation, hat 2015 das Internationale Höhenreferenzsystem (IHR) als konventionellen Standard für die Bestimmung von kohärenten und präzisen physikalischen Höhen weltweit eingeführt. Im IHR ist die primäre vertikale Koordinate ebenfalls die geopotenzielle Kote ($C_P = W_0 - W_P$), jedoch bezogen auf eine globale Äquipotenzialfläche des Erdschwerfeldes, die durch einen konventionellen W_0 -Wert definiert ist (bekannt als das Potenzial des Geoids), und

nicht auf den an einem lokalen Pegel ermittelten mittleren Meeresspiegel, wie es in den lokalen Höhensystemen üblich ist. Um mit der am meisten akzeptierten Definition des Geoids durch Carl Friedrich Gauß übereinzustimmen (d. h. der Äquipotenzialfläche, die sich am besten der weltweiten mittleren Meeresoberfläche anpasst), wurde der für das IHR angenommene W_0 -Referenzwert aus der globalen mittleren Meeresoberfläche abgeleitet, die seit fast 30 Jahren mithilfe der Satellitenaltimetrie beobachtet wird.

Das Nullhöheniveau des IHR ist überall verwendbar und die geopotenziellen Koten (oder physikalischen Höhen), die sich auf das IHR beziehen, sind global konsistent; sie hängen nicht von den lokalen Meeresspiegeln ab.

Da der Bezugswert W_0 festgelegt und konventionell übernommen wird, ist die zu bestimmende Koordinate bei der IHR-Realisierung das Potenzial W_P . Für eine eindeutige Potenzialwertberechnung muss die Lage der Berechnungspunkte genau bekannt sein. Dies geschieht durch den Bezug auf das Internationale Terrestrische Referenzsystem (ITRS), das der GNSS-Positionierung zugrunde liegt.

Die Bahnen der GNSS-Satelliten werden im ITRS bestimmt und die aus der GNSS-Positionierung gewonnenen Koordinaten beziehen sich direkt auf dieses Bezugssystem. Die primären ITRS-Koordinaten sind geozentrische kartesische 3-D-Koordinaten \mathbf{X} (X, Y, Z), die für praktische Zwecke normalerweise in geografische (oder ellipsoidische) Breite (φ), Länge (λ) und Höhe (h) umgerechnet werden. Somit stellt das globale Höhenreferenzsystem IHR im

»

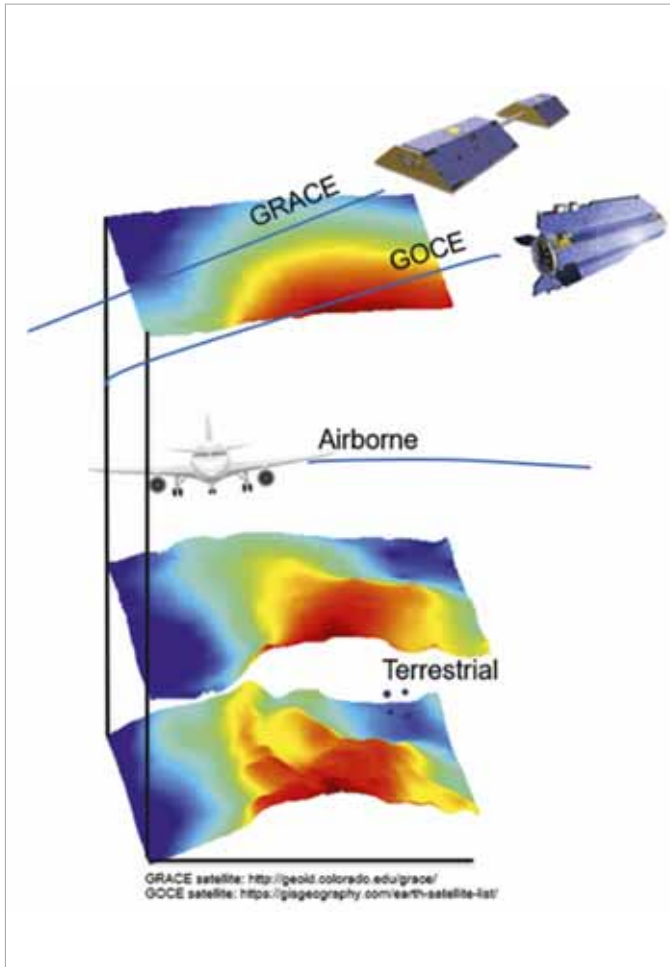


Abbildung 4 | Hoch aufgelöste Schwerefeldmodellierung, basierend auf der Kombination von globalen Satellitendaten mit regionalen (flugzeuggestützten und terrestrischen) Schwerefelddaten (mit freundlicher Genehmigung von Q. Liu, DGFI-TUM).

Die Satellitenschwerefelddaten liefern das langwellige Referenzniveau für alle Länder der Erde.

Die regionalen/lokalen Schwerefelddaten stellen das durch die Satelliten nicht erfasste kurzwellige Signal (aufgrund der Abschwächung des Schwerefeldes in der Höhe der Satelliten) in hoher Auflösung dar.

Wesentlichen die Kombination aus einer geometrischen Komponente, die durch den Koordinatenvektor \mathbf{X} im ITRS gegeben ist, und einer physikalischen Komponente, die durch die Bestimmung der Potenzialwerte W in \mathbf{X} gegeben ist, dar (Abbildung 3).

Sobald W bekannt ist, wird die geopotenzielle Kote ($C_P = W_0 - W_P$) unter Verwendung des konventionellen W_0 berechnet, und sie wird weiter in eine physikalische Höhe umgewandelt, indem sie durch einen Schwerewert geteilt wird (auf die gleiche Weise, wie es in den nationalen Nivellementsnetzen geschieht).

DAS SCHWEREFELD DER ERDE ALS BASIS DES IHRS

Während die geometrischen Koordinaten \mathbf{X} mithilfe von GNSS gewonnen werden können, sind die Werte W aus Schwerefeldbeobachtungen unter Anwendung geeigneter Modellierungsverfahren zu bestimmen. Bei diesen Verfahren werden Satelliten- und terrestrische (flugzeuggestützte oder marine) Schwerefeldbeobachtungen optimal kombiniert, um eine möglichst hohe Genauigkeit in der vertikalen Koordinate zu erreichen. Während die Satellitenschwerefelddaten die Realisierung eines gemeinsamen Referenzniveaus für alle Länder der Erde sicherstellen, erhöhen die lokalen terrestrischen Schwerefelddatensätze die Auflösung der Schwerefeldmodellierung und tragen stark zur Verbesserung der Genauigkeit der Potenzialwerte W bei.

In der Tat ist die Realisierung eines globalen Höhensystems wie des IHRS dank der Verfügbarkeit spezieller Satelliten-Schwerefeldmissionen, insbesondere GRACE, GRACE-FO und GOCE, zum ersten Mal machbar. Die von diesen Satellitenmissionen gelieferten Daten bieten Höhengenaugigkeiten im Bereich von 2 cm bei einer Auflösung von etwa 100 km. Die terrestrischen Schwerefeldbeobachtungen werden dann benötigt, um das von den Satelliten aufgrund der Abschwächung des Schwerefeldes in der Höhe der Satelliten nicht erfasste Schweresignal zu berücksichtigen (Abbildung 4).

In Regionen mit guter Abdeckung durch terrestrische, flugzeuggestützte oder marine Schwerefelddaten (wie Kanada, USA, Deutschland) dürfte die Genauigkeit der IHRS-Koordinaten zurzeit etwa 2 bis 5 cm erreichen. In Regionen mit einer geringeren Datenabdeckung (wie Australien, Japan und einige Länder in Europa) kann die Genauigkeit der IHRS-Koordinaten zurzeit etwa 5 bis 10 cm betragen. In Regionen mit wenigen (oder keinen) terrestrischen Daten (wie Südamerika, Afrika und große Teile Asiens) kann der IHRS-Koordinatenfehler einen Mittelwert von etwa 45 cm erreichen, mit Extremwerten bis zu 2 m (oder sogar mehr) in Gebieten mit starken Topografiegradienten. Um weltweit eine homogene und höhere Zuverlässigkeit der IHRS-Koordinaten zu gewährleisten, ist es daher notwendig, die Abdeckung und Qualität der terrestrischen Schwerefelddaten zu verbessern.

Die angestrebte Genauigkeit bei der Realisierung des IHRS beträgt 3 mm für die stationären Höhenwerte und 0,3 mm/Jahr in den zeitlichen Höhenänderungen. Während diese Genauigkeit bei der Bestimmung der geometrischen Lage möglich ist, wird die Bestimmung der Höhen von vielen Faktoren beeinflusst, sodass deren Genauigkeit um zwei bis drei Größenordnungen schlechter ist.

Daher konzentrieren sich die derzeitigen Bemühungen darauf, eine Genauigkeit von 1 cm bei den statischen Höhenwerten zu erreichen. Sobald dies erreicht ist, wird die Bestimmung der zeitlich veränderlichen Höhenkomponenten in nächster Zukunft im Fokus sein.

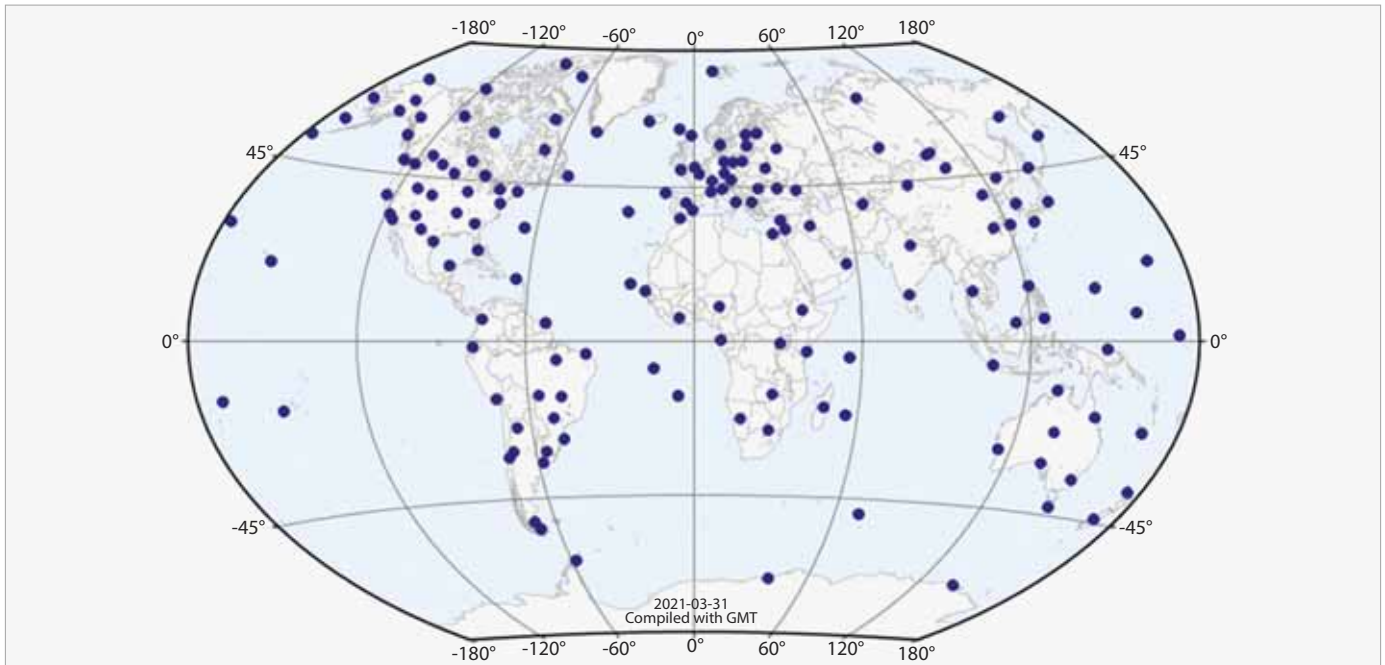


Abbildung 5 | Referenzstationen des Internationalen Höhenreferenzrahmens (IHRF): die Realisierung des IHRS.

INTERNATIONALER HÖHENREFERENZRAHMEN (IHRF): DIE REALISIERUNG DES IHRS

Die Realisierung des IHRS durch einen Satz von Stationen, deren Gesamtheit IHRF (Internationaler Höhenreferenzrahmen) genannt wird (entsprechend dem ITRF als Realisierung des ITRS), erfordert vier Hauptelemente:

- einen globalen Satz von Referenzstationen mit weltweiter Verteilung, bestehend aus (i) einem Kernnetz, um die Dauerhaftigkeit und Langzeitstabilität des Referenzrahmens zu gewährleisten, und (ii) regionalen und nationalen Verdichtungen, um die lokale Zugänglichkeit zum globalen Höhensystem zu ermöglichen;
 - eine Zusammenstellung klarer Standards, Konventionen und Verfahren für die Bestimmung der IHRF-Koordinaten, um sicherzustellen, dass die numerischen Werte strikt der Definition des Bezugssystems folgen;
 - die Berechnung von Referenzkoordinaten an den Referenzstationen und Richtlinien für die Verdichtung des IHRF auf regionaler und nationaler Ebene;
 - eine betriebliche und organisatorische Infrastruktur (Referenzstationen, Datenzentren, Analysezentren, Kombinationszentren, Produktzentren etc.), um die Wartung und Verfügbarkeit des IHRF langfristig zu gewährleisten.
- Die Hauptkriterien für die Auswahl von IHRF-Referenzstationen umfassen:
- kontinuierlich beobachtende GNSS-Referenzstationen, um Deformationen des Referenzrahmens zu erkennen (bevorzugt werden Stationen, die zum ITRF gehören, sowie regionale Referenzrahmen wie das permanente EUREF-Netz, das lateinamerikanische SIRGAS etc.);
 - Zusammenlegung mit fundamentalen geodätischen Observatorien (wie Wettzell in Deutschland), um eine konsistente Verbindung zwischen geometrischen Koordinaten, Potenzial- und Schwerewerten und Referenzhöhen zu gewährleisten;
 - Zusammenlegung mit Referenzstationen des Internationalen Schwerebezugssystems (IGRS) zur Integration der Schwere- und physikalischen Höhenreferenzrahmen;
 - Zusammenlegung mit Referenzpegeln und Verbindung mit den nationalen Nivellementsnetzen, um die Transformation der lokalen Höhensysteme in das globale Höhensystem zu ermöglichen;
 - Verfügbarkeit von terrestrischen Schwerfelddaten um die IHRF-Referenzstationen als Hauptvoraussetzung für die hoch aufgelöste Schwerfeldmodellierung (d. h. die präzise Berechnung von Potenzialwerten).



Das IHRF-Hauptreferenznetz umfasst zurzeit etwa 170 Stationen (Abbildung 5) und wird derzeit regelmäßig in Abstimmung mit Änderungen/Aktualisierungen anderer geodätischer Bezugsrahmen verfeinert.

Basierend auf dieser Stationsauswahl wurde Anfang 2021 die Berechnung einer ersten Lösung für die IHRF-Referenzkoordinaten begonnen. Diese Tätigkeit wird von ca. 40 Experten für die Schwerefeldmodellierung aus Kanada, Mexiko, den USA, Argentinien, Brasilien, Chile, Kolumbien, Peru, Deutschland, Italien, der Schweiz, Österreich, Schweden, Finnland, Russland, Australien, Japan, China und Afrika unterstützt. Derzeit ist die Berechnung der IHRF-Koordinaten an 45 % der Referenzstationen abgeschlossen und die jetzigen Arbeiten konzentrieren sich an den restlichen Stationen.

INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT ALS WESENTLICHE VORAUSSETZUNG FÜR DIE NACHHALTIGKEIT DES IHRS


Ein Hauptgrund für die Definition des IHRS und seine Realisierung durch den IHRF ist es, die Überwachung und Analyse der Veränderungen des Erdsystems zu unterstützen. Je genauer der IHRF ist, desto mehr Phänomene können identifiziert und modelliert werden. Daher müssen die IHRF-Koordinaten und deren Änderungen mit der Zeit so genau wie möglich bestimmt werden. Da viele Phänomene des globalen Wandels in unterschiedlichen Maßstäben auftreten, sollte der globale Rahmen auf regionaler und lokaler Ebene erweitert werden, um Konsistenz bei der Beobachtung, Erkennung und Modellierung ihrer Auswirkungen zu gewährleisten. Aus dieser Perspektive ist es notwendig, eine internationale operative Infrastruktur aufzubauen, die sich um Folgendes kümmert:

- Nachhaltigkeit des IHRF-Referenznetzes
- Laufendhaltung eines Katalogs mit den für die Realisierung des IHRS benötigten Konventionen und Standards
- Koordinierung, Validierung und Aktualisierung der Berechnung der Referenzkoordinaten
- Speicherung, Verwaltung und Laufendhaltung der mit den Potenzialwerten verbundenen Metadaten an IHRF-Stationen sowie der Transformationsparameter zwischen den lokalen und globalen Höhensystemen
- Weiterentwicklung der IHRS-Definition in Übereinstimmung mit zukünftigen theoretischen und technologischen Verbesserungen in der Schwerefeldmodellierung und präzisen Positionierung

Dies macht deutlich, dass die Implementierung eines globalen Referenzsystems für physikalische Höhen wie das IHRS eine große Herausforderung ist und die Unterstützung einer breiten wissenschaftlichen Organisation erfordert. Die Realisierung des IHRF kann nicht von einem Land oder einer Universität oder einem nationa-

len geodätischen Amt vorgenommen werden. Der IHRF ist nur innerhalb einer globalen und gut strukturierten Organisation wie der IAG machbar. Obwohl noch viel Arbeit nötig ist, stellen die in diesem Beitrag beschriebenen Fortschritte die ersten konkreten Schritte zur Etablierung eines globalen Höhensystems dar, das seit den 1970er-Jahren des letzten Jahrhunderts in Diskussion war. Wir sind zuversichtlich, dass, sobald wir eine erste Koordinatenlösung für den IHRF implementiert haben, diese verbessert werden kann, indem mehr und mehr Details berücksichtigt werden, die zu Beginn vielleicht unlösbare Hindernisse darstellen.

SCHLUSSBEMERKUNGEN

Aus praktischer Sicht stellt das IHRS ein unschätzbbares Werkzeug für die Bestimmung physikalischer Höhen dar, insbesondere in Regionen unter extremen Bedingungen, in denen eine vertikale Positionierung nicht möglich ist oder mit langen, zeitaufwendigen Feldkampagnen mit großem menschlichem Aufwand und hohen Kosten verbunden ist, wie z. B. im Hochgebirge, in Wüsten, in Sümpfen oder im Dschungel. Ein prominentes Beispiel für die Anwendbarkeit des IHRS ist die aktuelle Höhenbestimmung des Mount Everest im Jahr 2020. Würde man diese Höhe auf das chinesische oder das nepalesische Höhensystem beziehen, ergäben sich unterschiedliche Werte, was die Entscheidung erschwert, welches Höhensystem das richtige ist. Um Diskrepanzen zu vermeiden, einigten sich die chinesische und nepalesische Regierung darauf, die neue Höhe des Mount Everest auf das IHRS zu beziehen. Somit bezieht sich der neue Wert 8.848,86 m, der im Dezember 2020 veröffentlicht wurde, auf das Nullhöheniveau des IHRS. Wir sollten jedoch bedenken, dass bei lokalen Anwendungen, die eine Genauigkeit im mm-Bereich erfordern, das geodätische Nivellement weiterhin die geeignete Technik ist. Höchstwahrscheinlich werden gut etablierte und präzise lokale Höhensysteme (wie in Deutschland) weiterhin im täglichen Gebrauch sein, während das IHRS für Untersuchungen des globalen Wandels und transnationale/transregionale Anwendungen, die eine konsistente Verbindung der lokalen Höhensysteme erfordern, nutzbar sein wird. 

ABKÜRZUNGEN

APG	Lehrstuhl für Astronomische und Physikalische Geodäsie
DGFI-TUM	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München
EUREF	Reference Frame Sub-Commission for Europe of the International Association of Geodesy
GGOS	Global Geodetic Observing System
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GOCE	Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GRACE-FO	Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On



IAG	International Association of Geodesy
IGRS	International Gravity Reference System
IHRF	International Height Reference Frame
IHRS	International Height Reference System
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
SIRGAS	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas

LITERATUR (AUSWAHL)

- Drewes H, Kuglitsch F, Ádám J, Rózsa S (2016) Geodesist's Handbook 2016, IAG Resolution No. 1 (2015) on the definition and realisation of an International Height Reference System. *Journal of Geodesy* 90, 907, <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0948-z>.
- Drinkwater MR, Floberghagen R, Haagmans R, Muzi D, Popescu A (2003) GOCE: ESA's first Earth Explorer Core mission. In: Beutler G et al. (Eds) *Earth gravity field from space – from sensors to Earth science*. Space Sciences Series of ISSI, Vol 18, 419-432, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, https://doi.org/10.1007/978-94-017-1333-7_36.
- Ihde J, Sánchez L (2005) A unified global height reference system as a basis for IGGOS. *Journal of Geodynamics* 40(4-5), 400-413, <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.06.015>.
- Ihde J, Sánchez L, Barzaghi R, Drewes H, Foerste C, Gruber T, Liebsch G, Marti U, Pail R, Sideris M (2017) Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHRF). *Surveys in Geophysics* 38(3), 549-570, <https://doi.org/10.1007/s10712-017-9409-3>.
- Kornfeld RP, Arnold BW, Gross MA, Dahya NT, Klipstein WM, Gath PF, Bettadpur S (2019) GRACE-FO: The Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On Mission. *Journal of Spacecraft and Rockets* 2019 56(3), 931-951, <https://doi.org/10.2514/1.A34326>.
- Rummel R, Gruber T, Ihde J, Liebsch G, Rülke A, Schäfer U, Sideris M, Rangelova E, Woodworth P, Hughes C (2014) STSE-GOCE+, Height system unification with GOCE, Doc. No. GO-HSU-PL-002, Issue 1, 24-02-2014.
- Sánchez L, Barzaghi R (2020) Activities and plans of the GGOS Focus Area Unified Height System, EGU General Assembly 2020, EGU2020-8625, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8625>.
- Sánchez L, Sideris MG (2017) Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHRF). *Geophysical Journal International* 209(2), 570-586, <https://doi.org/10.1093/gji/ggx025>.
- Sánchez L, Ågren J, Huang J, Wang YM, Mäkinen J, Pail R, Barzaghi R, Vergos GS, Ahlgren K, Liu Q (2021) Strategy for the realisation of the International Height Reference System (IHRF). *Journal of Geodesy* 95(3), <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01481-0>.
- Sánchez L, Čunderlík R, Dayoub N, Mikula K, Minarechová Z, Šíma Z, Vatrt V, Vojtišková M (2016) A conventional value for the geoid reference potential W_0 . *Journal of Geodesy* 90(9), 815-835, <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0913-x>.
- Tapley BD, Bettadpur S, Watkins M, Reigber C (2004) The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results, *Geophysical Research Letters* 31(9), L09607, <https://doi.org/10.1029/2004GL019920>.



Dr.-Ing. Laura Sánchez
Technische Universität München
lm.sanchez@tum.de