

GNSS-Referenzsysteme – vom Systembetreiber zum Nutzer

Peter Steigenberger

1 Grundlagen

Geodätische Referenzsysteme bilden die metrologische Grundlage für globale Navigationssatellitensysteme (GNSS). Sie sind durch Ursprung, Orientierung und Skalierung definiert, siehe Abb. 1. Geozentrische und erdfeste Referenzsysteme (ECEF: Earth-centered Earth-fixed) haben ihren Ursprung im Erdmittelpunkt, sind mit der Erdoberfläche fest verbunden und drehen sich dadurch mit der Erde mit. Somit haben sie den Vorteil, dass Stationen auf der Erdkruste nur kleinen Variationen (Plattentektonik, Gezeiteneffekte etc.) unterworfen sind.

Geozentrische Inertialsysteme (ECI: Earth-centered inertial) haben ihren Ursprung ebenfalls im Erdmittelpunkt, ihre Orientierung folgt aber nicht der täglichen Erdrotation sondern bezieht sich auf extraterrestrische Objekte, die als raumfest angenommen werden. Für die GNSS-Anwender sind in erster Linie erdfeste Referenzsysteme relevant. Inertiale Referenzsysteme werden u. a. für die Bahnbestimmung von GNSS-Satelliten sowie GNSS-Anwendungen im Weltall benötigt.

Referenzrahmen bilden die Realisierung von Referenzsystemen, in der Regel durch die Bestimmung von Koordinaten, Geschwindigkeiten und ggf. weiterer Parameter ausgewählter Beobachtungsstationen. Das International Terrestrial Reference Frame (ITRF) ist in den Konventionen des International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS, [Petit and Luzum, 2010](#)) folgendermaßen definiert:

- Der Ursprung ist das Massenzentrum der gesamten Erde einschließlich Atmosphäre und Ozeane.
- Die Orientierung ist durch das Bureau International de l'Heure (BIH) Terrestrial System zur Epoche 1984.0 definiert, die zeitliche Entwicklung wird durch eine no-net-rotation Bedingung bezüglich der horizontalen Bewegungen über die gesamte Erde vorgegeben.

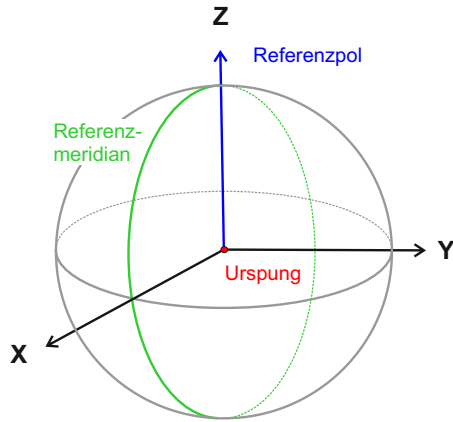


Abbildung 1: Definition des Ursprungs und der Orientierung eines Referenzsystems.

Tabelle 1: Beitrag der geodätischen Raumverfahren zu ITRF2020.

Technik	Zeitraum	Stationen
GNSS	1994.0 – 2021.0	1344
SLR	1983.0 – 2021.0	136
VLBI	1980.0 – 2021.0	154
DORIS	1993.0 – 2021.0	201

- Die Längeneinheit ist das SI Meter.

Das ITRF basiert auf Beobachtungen der geodätischen Raumverfahren

- GNSS: Globale Navigationssatellitensysteme (GPS, GLONASS, Galileo)
- SLR: Laserdistanzmessungen zu Satelliten
- VLBI: Radiointerferometrie auf langen Basislinien
- DORIS: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

sowie terrestrischen Verbindungsmessungen (local ties) an Stationen, die über mehrere Beobachtungsverfahren verfügen. Der Ursprung wird dabei durch SLR realisiert, die Skalierung durch SLR und VLBI. Weiterführende Informationen über die Definition und Realisierung von Referenzsystemen sind in [Angermann et al \(2013\)](#), [Jekeli and Montenbruck \(2017\)](#) und [Seitz et al \(2017\)](#) verfügbar.

Die aktuelle Realisierung des ITRS ist das ITRF2020 ([Altamimi et al, 2023](#)), das im April 2022 veröffentlicht wurde und insgesamt 1835 Stationen umfasst. Die Beiträge der geodätischen Raumverfahren zu ITRF2020 sind in [Tabelle 1](#) aufgeführt. Details zur Parametrisierung des ITRF2020 werden in [Abschnitt 3](#) diskutiert.

2 GNSS-Referenzrahmen

Die vier globalen Navigationssatellitensysteme GPS, Galileo, BeiDou und GLONASS basieren jeweils auf eigenen Referenzrahmen, die in [Tabelle 2](#) aufgelistet sind. Diese sind allesamt an die zum Zeitpunkt ihrer Erzeugung aktuelle Version des ITRF angeglichen.

Tabelle 2: Referenzrahmen der globalen Satellitennavigationssysteme.

GNSS	Referenzrahmen	Abk.	Referenz
GPS	World Geodetic System 1984	WGS84	DoD (2014)
Galileo	Galileo Terrestrial Reference Frame	GTRF	GSA (2021)
BeiDou	BeiDou Coordinate System	BDCS	CSNO (2019)
GLONASS	Parametry Zemly 1990	PZ90.11	MoD (2014)

GPS Das amerikanische Global Positioning System (GPS) verwendet das World Geodetic System 1984 (WGS84, [DoD, 2014](#)). WGS84 basiert auf den sechs Monitorstationen der US Air Force (USAF) und 11 Stationen der National Geospatial Intelligence Agency (NGA). Derzeit sind GPS-Beobachtungsdaten von 9 NGA Stationen (jeweils 2 Empfänger) im RINEX 2 Format ([Gurtner and Estey, 2006](#)) über die Datenzentren (z. B. CDDIS¹) des International GNSS Service (IGS, [Johnston et al, 2017](#)) verfügbar. Zehn dieser Empfänger sind in ITRF2020 enthalten, so dass hier ideale Voraussetzungen für eine Angleichung der beiden Referenzrahmen vorliegen.

Die Stationskoordinaten der USAF- und NGA-Stationen sind öffentlich verfügbar, so dass in Verbindung mit den Beobachtungsdaten der NGA-Stationen durch differentielle Positionierung ein direkter Zugang zum WGS84 möglich ist. Seit 3. Januar 2021 wird die WGS84-Realisierung G2139 verwendet ([NGA, 2021](#)), die konsistent mit ITRF2014 bzw. der entsprechenden IGS-Realisierung IGB14 ist. Die Konsistenz der früheren Realisierung G1762 mit ITRF2008 wird in [DoD \(2014\)](#) mit 1 cm (RMS Differenz) angegeben.

¹<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily>

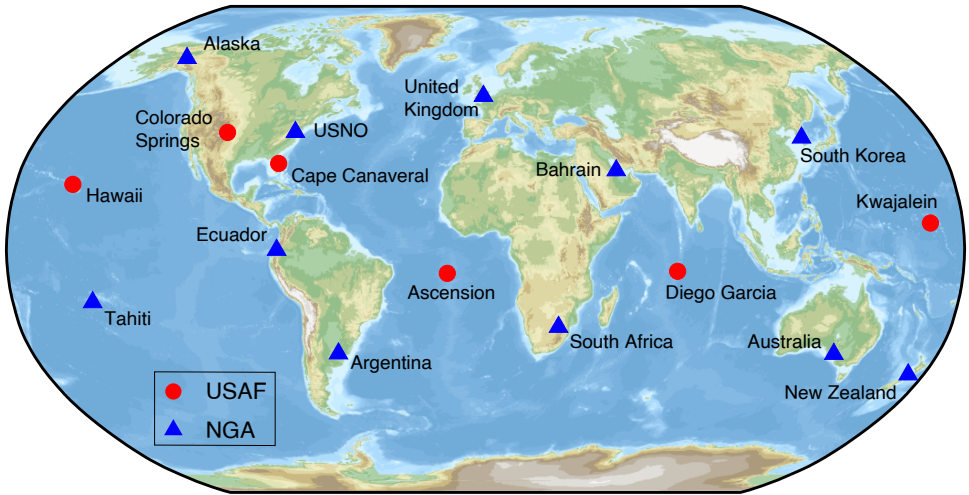


Abbildung 2: Stationen des WGS84.

Galileo Das europäische GNSS Galileo basiert auf dem Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF), das vom Galileo Geodetic Reference Service Provider (GRSP) bereitgestellt wird. Das GTRF ist eine unabhängige Realisierung des ITRS und besteht im Kern aus den momentan 15 Galileo Sensor Stations (GSSs). Neben den GSSs, die Bestandteil des operationellen Galileo Systems sind, tragen noch 17 Galileo Experimental Sensor Stations (GESSs) sowie eine größere Anzahl an IGS-Stationen zum GTRF bei. Die aktuelle Version GTRF23v01 wird seit 5. Mai 2023 verwendet und ist über 90 IGS-Stationen an ITRF2020 angeglichen. Das GTRF wird mindestens einmal im Jahr aufdatiert, bei Bedarf (z.B. aufgrund signifikanter Koordinatenänderungen durch Erdbeben) auch öfter. Die Koordinatendifferenzen zwischen GTRF und ITRF müssen dabei gemäß [GSA \(2021\)](#) kleiner als 3 cm (2σ) sein.

BeiDou Das BeiDou Coordinate System (BDCS) ist ebenfalls eine Realisierung des ITRS ([CSNO, 2019](#)). Es besteht aus etwa 100 Stationen, davon 10 Monitorstationen des operationellen BeiDou-Systems. Die aktuelle Version 2019V01 ist dabei über 31 IGS-Stationen an ITRF2014 angeglichen. Laut [Zhou et al \(2022\)](#) ist die Genauigkeit der Koordinaten besser als 1 cm. Die Translationen gegenüber ITRF2014 liegen im Bereich von 0.2 bis 3 mm, die Rotationen betragen bis zu 0.1 mas und die Differenz in der Skalierung ist 0.01 ppb.

GLONASS GLONASS basiert auf dem System Parametry Zemly 1990 (Erdparameter 1990), das eine Realisierung des ITRS basierend auf 8 Monitorstationen

und 11 IGS-Stationen auf russischem Territorium ist. Die aktuelle Version PZ-90.11 stammt aus dem Jahr 2011 und ist an ITRF2008 angeglichen. Die Genauigkeit des Ursprungs wird in MoD (2014) mit 5 cm angegeben, die Orientierung mit 1 mas und die Relativposition der Stationen mit 0.5 bis 1.0 cm.

3 Referenzrahmen im International GNSS Service

Die IGS-Produkte beziehen sich jeweils auf einen eigenen IGS-Referenzrahmen, der zwar an die entsprechende ITRF-Version angeglichen ist, sich von dieser aber dennoch unterscheidet. Die Parametrisierung ist aber jeweils identisch zur entsprechenden ITRF-Version. Koordinaten x zur Beobachtungsepoche t werden durch eine Koordinate zur Referenzepeche t_0 und eine dazugehörige Stationsgeschwindigkeit $\dot{x}$ dargestellt:

$$x(t) = x(t_0) + \dot{x} \cdot (t - t_0) \quad (1)$$

Koordinatendiskontinuitäten z. B. aufgrund von Antennenwechseln werden durch unterschiedliche Koordinatensätze und ggf. auch Geschwindigkeitssätze berücksichtigt. Größere Abweichungen von diesem linearen Modell werden in erster Linie durch Erdbeben verursacht. Postseismische Deformationen (PSDs) werden durch ein Modell mit einem logarithmischen (Index l) und einem exponentiellen Anteil (Index e) beschrieben:

$$\text{PSD}(t) = \sum_{i=1}^{n^l} A_i^l \log \left(1 + \frac{t - t_i^l}{\tau_i^l} \right) + \sum_{i=1}^{n^e} A_i^e \left(1 - e^{-\frac{t - t_i^e}{\tau_i^e}} \right) \quad (2)$$

n ist dabei die Anzahl der vor t stattgefundenen Erdbeben, t_i die Epoche des Erdbebens i und τ_i die jeweilige Abklingzeit. Je nach Verhalten der Stationsbewegung kann nur der logarithmische Anteil, nur der exponentielle Anteil, oder die Kombination aus beiden verwendet werden.

Abbildung 3 zeigt die Zeitreihe der Ostkomponente der IGS-Station AREQ00PER in Arequipa (Peru), die am 23. Juni 2001 von einem Erdbeben der Stärke 8.4 betroffen war. Dieses äußert sich in einem Sprung von etwa einem halben Meter und einer anschließenden, sich über mehrere Jahre erstreckenden post-seismischen Phase. In dieser treten Differenzen von bis zu 30 cm bezüglich des linearen Modells (grün) auf. Die Abweichungen gegenüber dem PSD-Modell liegen hingegen lediglich im Bereich weniger Millimeter. Die vertikalen Linien in Abb. 3 markieren Diskontinuitäten aufgrund eines Antennenwechsels im Jahr 2018 sowie weiterer Erdbeben, die wegen ihrer geringeren Stärke und/oder größeren Entfernung einen deutlich kleineren Einfluss auf die Station hatten.

Erstmals wurden bei ITRF2020 auch saisonale Variationen $\Delta x_s(t)$ der Stationskoordinaten in Form von jährlichen ($j = 1$) und halbjährlichen ($j = 2$) Sinus- und Cosinuskoeffizienten a_j und b_j bestimmt:

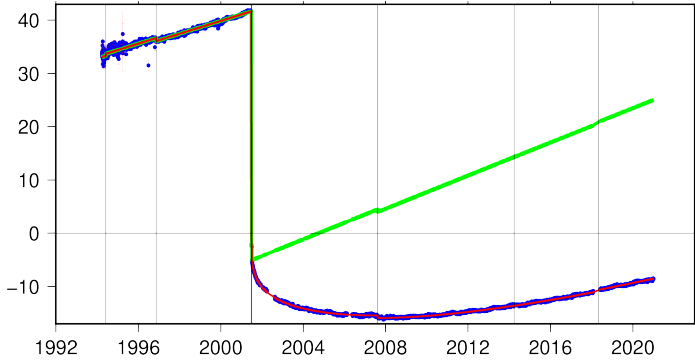


Abbildung 3: Ostkomponente der IGS-Station AREQ00PER in Arequipa (Peru), blau: tägliche GNSS-Lösungen, grün: lineares Modell, rot: PSD-Modell. Die vertikalen Linien markieren Diskontinuitäten. Quelle: https://itrf.ign.fr/plots/ITRF2020/gnss/tplot/TAREQ_42202M005.png

$$\Delta x_s(t) = \sum_{j=1}^{n_f} a_j^i \cos \omega_j t + b_j^i \sin \omega_j t \quad (3)$$

Für die Erzeugung der operationellen IGS-Produkte werden diese Terme momentan aber nicht berücksichtigt. Die beobachteten und modellierten saisonalen Variationen sind exemplarisch für die Station Porto Velho (Brasilien) in Abb. 4 dargestellt. Die Amplitude der modellierten jährlichen Schwingung beträgt etwa 15 mm. Die Standardabweichung nach Berücksichtigung des saisonalen Modells liegt bei 5 mm.

Für GNSS-Anwendungen spielt die Konsistenz des verwendeten Antennenmodells mit dem entsprechenden Referenzrahmen eine wichtige Rolle. Die GNSS-Lösung für ITRF2020 wurde im Rahmen der dritten Reprozessierungskampagne des IGS (repro3) mit dem dedizierten Antennenmodell `igsR3.atx` erzeugt. Dieses unterscheidet sich vom damals in der operationellen Prozessierung verwendeten IGS-Antennenmodell `igs14.atx` u. a. durch Mehrfrequenzkalibrierungen von 37 häufig verwendeten Empfängerantennen (Wübbena et al, 2019), die eine konsistente Prozessierung von Galileo E5a-Beobachtungen ermöglichen. Im Gegensatz zu früheren IGS-Reprozessierungskampagnen wurden für repro3 erstmalig auch Galileo-Beobachtungen verwendet.

Für das aktuelle Antennenmodell `igs20.atx` wurden weitere L1/L2-Empfängerantennenkalibrierungen aus `igsR3.atx` durch Mehrfrequenzkalibrierungen ersetzt. Da ein Wechsel der Antennenkalibrierung auch eine Änderung der damit bestimmten Stationskoordinaten nach sich zieht ist `igs20.atx` dadurch nicht mehr kompatibel mit repro3 bzw. ITRF2020. Um diese Inkonsistenz zu beheben wurden für

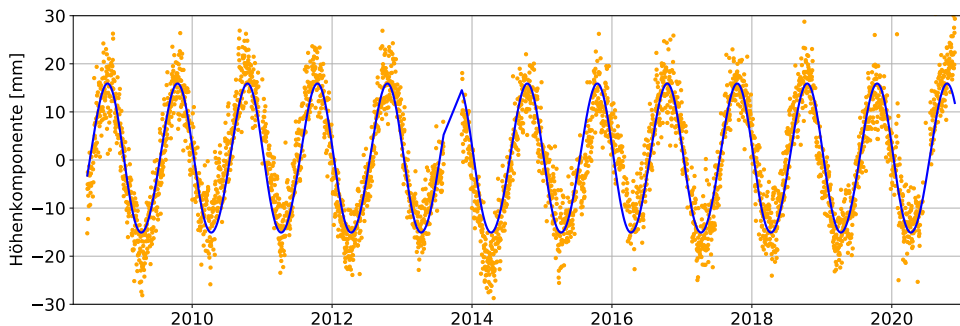


Abbildung 4: Höhenkomponente der IGS-Station POVE00BRA in Porto Velho (Brasilien): Beobachtung (orange Punkte) und Modell (blaue Linie).

Stationen mit den entsprechenden Antennen Koordinatendifferenzen zwischen PPP-Lösungen mit `igsR3.atx` und `igs20.atx` bestimmt. Diese Korrekturen betragen bis zu 3 mm für die Lagekomponenten und bis zu 13 mm für die Höhe und wurden für den IGS-Referenzrahmen IGS20 an den ITRF2020-Koordinaten angebracht. Obwohl sich die Stationskoordinaten der betroffenen Stationen somit von ITRF2020 unterscheiden ist IGS20 bezüglich Ursprung, Orientierung und Skalierung identisch mit ITRF2020. IGS20 besteht aus insgesamt 332 Stationen aus dem ITRF2020, siehe Abb. 5, die über eine hohe Stabilität und ein niedriges Rauschen der Koordinatenzeitreihen verfügen. Gegenüber seinem Vorgänger IGB14 beinhaltet IGS20 98 zusätzliche Stationen, 25 Stationen aus IGB14 wurden nicht mehr berücksichtigt. Aufgrund der oben genannten Gründe muss der IGS20 Referenzrahmen immer zusammen mit dem `igs20.atx` Antennenmodell verwendet werden, um eine konsistente Datenauswertung zu gewährleisten.

Wie ITRF2020 ist IGS20 ein statischer Referenzrahmen, d.h. es werden keine Veränderungen (z.B. Erdbeben, Sprünge durch Antennenwechsel etc.) berücksichtigt, die nach der Erzeugung dieser Referenzrahmen auftreten. Solche Änderungen sind in den kumulativen IGS-Lösungen berücksichtigt. Diese beinhalten dabei Daten aus dem gesamten repro3-Zeitraum (2. Januar 1994 bis 31. Dezember 2020), die mit Daten aus der operationellen Prozessierung ergänzt werden. Sie werden alle 8 Wochen aktualisiert und sind bezüglich Ursprung, Orientierung und Skalierung an IGS20 angeglichen.

4 Zugang zu Referenzrahmen

Der Zugang zu einem bestimmten Referenzrahmen wird dem GNSS-Nutzer bei der Absolutpositionierung über die dafür erforderlichen Bahn- und Uhrenprodukte

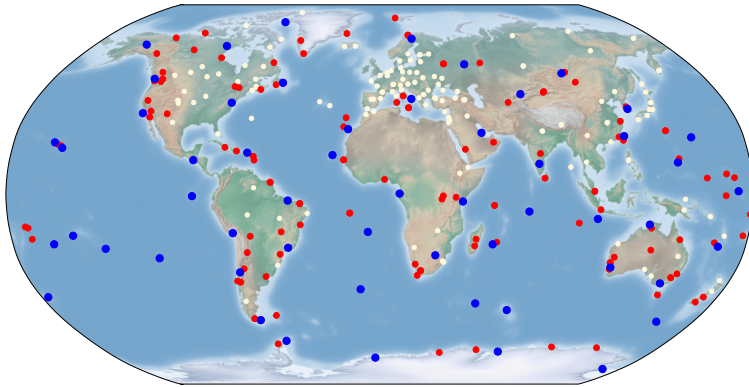


Abbildung 5: Stationen des IGS20 Referenzrahmens. Primäre Kernstationen sind in blau dargestellt, weitere Kernstationen in rot.

ermöglicht. Bei der Relativpositionierung erfolgt der Zugang über die Koordinaten der Referenzstation(en). Nutzer der von den GNSS-Betreibern zur Verfügung gestellten Positionierungsdienste, z.B. dem GPS Standard Positioning Service (SPS, [GPS SPS PS, 2020](#)) oder dem Galileo Open Service (OS, [GSA, 2021](#)), greifen hierfür auf die Bahn- und Uhreninformationen aus der Navigationsnachricht zurück.

Für deren Erzeugung werden Beobachtungsdaten der Monitorstationen im Kontrollzentrum für die Bahn- und Uhrenbestimmung verwendet. Hierbei werden die Koordinaten der Monitorstationen fixiert, die in den Referenzrahmen des jeweiligen GNSS gegeben sind (Tabelle 2). Die so geschätzten und prädierten Bahn- und Uhrenparameter werden über Uplink-Stationen zu den GNSS-Satelliten transferiert und von diesen in Form der Navigationsnachricht an die Nutzer übertragen, siehe Abb. 6. Somit sind die dadurch bestimmten Koordinaten im Referenzrahmen des Systembetreibers gegeben. Die Positionierungsgenauigkeit wird aber durch die Genauigkeit der Broadcastbahnen und -uhren beschränkt und liegt deutlich über den Differenzen zwischen den GNSS-Referenzrahmen und dem ITRF. Der Signal-in-Space Range Error (SISRE, [Montenbruck et al, 2015](#)) spiegelt im wesentlichen die Bahn- und Uhrengenauigkeit wider. Für die Broadcastbahnen und -uhren beträgt er für GPS etwa 0.5 m, für Galileo 0.20 bis 0.25 m, für BeiDou einen Meter und für GLONASS zwei Meter ([Montenbruck et al, 2018](#)).

Bei der Absolutpositionierung mit präzisen Bahn- und Uhrenprodukten liegen die Positionierungsergebnisse im bei der Produktgenerierung verwendeten Referenzrahmen vor. Die IGS-Produkte basieren seit dem 27. November 2022 (GPS-Woche 2238) auf dem Referenzrahmen IGS20 und dem Antennenmodell `igs20.atx`. Precise Point Positioning (PPP) mit präzisen Bahn- und Uhrenprodukten des IGS liefert somit Stationskoordinaten im Referenzrahmen IGS20.

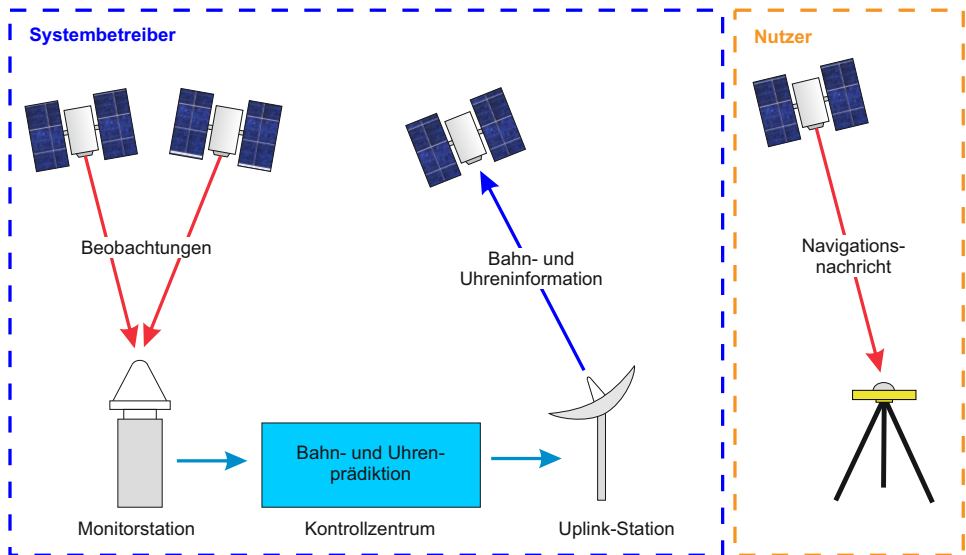


Abbildung 6: Erzeugung der GNSS-Navigationsnachricht und Übertragung zum Nutzer.

Tabelle 3: Referenzrahmenprodukte des IGS. **yyyy** und **ddd** stehen dabei für das Jahr und den Tag des Jahres, **www** für die GPS-Woche.

Produkt	Dateiname	Quelle
Tageslösung	IGS00PSSNX_yyyyddd0000_01D_01D_CRD.SNX	a
Wochenlösung	IGS00PSSNX_yyyyddd0000_07D_07D_CRD.SNX	a
Kumulative Lösung	IGS00PSSNX_1994002_yyyyddd_00U_SOL.SNX	b
IGS20	IGS20.ssc	c
IGS20 PSDs	psd_IGS20.snx	c

^a <ftp://igs-rf.ign.fr/pub/www/>

^b <ftp://igs-rf.ign.fr/pub/www/>, alle 8 Wochen verfügbar beginnend mit GPS-Woche 2253 (Rebischung, 2023)

^c <ftp://igs-rf.ign.fr/pub/IGS20/>

Für differentielle Positionierung im IGS20 Referenzrahmen sind entsprechende Stationskoordinaten und ggf. -geschwindigkeiten sowie PSDs erforderlich. Hierfür geeignete Produkte sind in Tabelle 3 aufgeführt. Sie werden vom IGS Reference Frame Coordinator als Kombinationslösung der einzelnen IGS-Analysezentren erzeugt. Die Tages- und Wochenlösungen beinhalten dabei jeweils nur Stationskoordinaten, die kumulative Lösung und IGS20 zusätzlich noch Stationsgeschwindigkeiten, zu denen auch jeweils passende PSDs verfügbar sind. Im Rahmen des Wechsels zu IGS20/igs20.atx wurden im IGS auch lange Dateinamen eingeführt, die in [IGS-IC \(2022\)](#) erläutert werden.

Koordinaten in inertialen Referenzrahmen werden für Weltraumanwendungen benötigt. Über modernisierte GNSS-Navigationsnachrichten werden dem Nutzer auch Erdrotationsparameter zur Verfügung gestellt ([Steigenberger et al, 2022](#)), die einen Zugang zum inertialen Referenzrahmen ermöglichen. Dies betrifft GPS mit CNAV auf den L2C- und L5-Signalen sowie CNAV-2 auf L1C und BeiDou mit CNAV-1 auf B1C, CNAV-2 auf B2a und CNAV-3 auf B2b. GLONASS und Galileo verfügen über keine derartigen Informationen. Die in CNAV übertragenen Erdrotationsparameter umfassen dabei die Polkoordinaten und UT1 sowie deren Raten.

Die Transformation einer erdfesten Position $\mathbf{r}_{\text{ECEF}}$ in den inertialen Referenzrahmen wird durch eine Matrixmultiplikation dargestellt ([Petit and Luzum, 2010](#)):

$$\mathbf{r}_{\text{ECI}} = \mathbf{Q}(t) \cdot \mathbf{R}(t) \cdot \mathbf{W}(t) \cdot \mathbf{r}_{\text{ECEF}} \quad (4)$$

Die Matrix $\mathbf{Q}$ beschreibt dabei den Einfluss von Nutation und Präzession, die beide hinreichend genau modelliert werden können ([Wallace and Capitaine, 2006](#)). In die Matrix $\mathbf{R}$ fließt über den Erdrotationswinkel UT1 ein, in $\mathbf{W}$ die Polbewegung. Somit ist mit den von CNAV übertragenen Erdrotationsparametern eine Transformation ins Inertialsystem möglich.

Bei den via CNAV übertragenen Erdrotationsparametern handelt es sich um Prädiktionen mit einer Genauigkeit von 0.3 bis 1.0 mas für die Polbewegung und etwa 0.13 ms für UT1 ([Steigenberger et al, 2022](#)). Dies entspricht einem Transformationsfehler von unter 1 m im geostationären Orbit. In Anbetracht der aktuell erreichbaren GNSS-Positionierungsgenauigkeit in dieser Orbithöhe von etwa 20 m ist dieser Fehler momentan vernachlässigbar. Die Differenzen zwischen den GPS CNAV Polparametern und der IERS C04 Referenzreihe sind in Abb. 7 dargestellt. Der RMS der Differenzen beträgt 0.70 mas für den X-Pol und 0.68 mas für den Y-Pol. Da die Differenzen für die jeweils erste Empfangsepoche eines neuen Datensatzes bestimmt wurden repräsentieren diese Werte allerdings eine optimistische Genauigkeitsabschätzung unter Idealbedingungen.

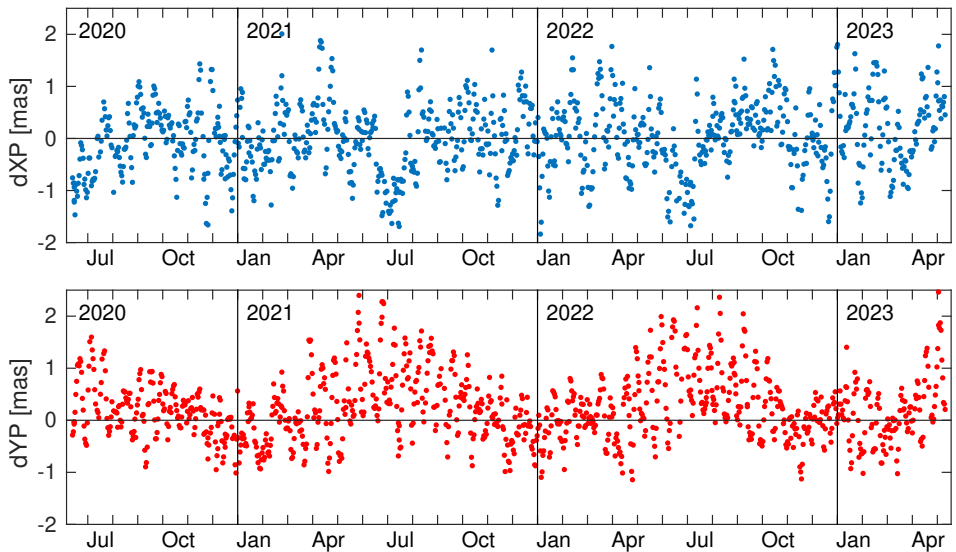


Abbildung 7: Differenzen zwischen GPS CNAV Polparametern und IERS C04.

5 Zusammenfassung

Der Zugang zu den Referenzrahmen der GNSS-Betreiber erfolgt über die Satellitenbahn- und -uhrenparameter, welche durch die Navigationsnachricht übertragen werden. WGS-84, GTRF, BDCS und PZ-90.11 sind dabei mit Zentimeter-Genauigkeit an die jeweilige ITRF-Version angeglichen. Aufgrund der deutlich höheren Fehler der Broadcast Bahnen und Uhren sind diese Differenzen vernachlässigbar.

Nutzer von präzisen Produkten des IGS erlangen durch diese den Zugang zum Referenzrahmen, der für die Erzeugung dieser Produkte verwendet wurde. Im Falle der Absolutpositionierung erfolgt dies über die Bahn- und Uhrenprodukte, im Falle der Relativpositionierung über die Koordinaten der Referenzstation(en). In beiden Fällen muss aber unbedingt auf die Verwendung des mit dem Referenzrahmen konsistenten Antennenmodells geachtet werden.

Literatur

- Altamimi Z, Rebischung P, Collilieux X, Métivier L, Chanard K (2023) ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. *Journal of Geodesy* 97(5), DOI 10.1007/s00190-023-01738-w
- Angermann D, Seitz M, Drewes H (2013) *Global Terrestrial Reference Systems and Their Realizations*, Springer Berlin Heidelberg, pp 97–132. DOI 10.1007/978-3-642-28000-9_3

- CSNO (2019) Beidou Coordinate System. URL <http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/201912/W020191209581164831734.pdf>
- DoD (2014) Department of Defence World Geodetic System 1984: Its definition and relationships with local geodetic systems. URL <https://nsgreg.nga.mil/doc/view?i=4085>, version 1.0.0
- GPS SPS PS (2020) Global positioning system standard positioning service performance standard. Tech. rep., URL <https://www.gps.gov/technical/ps/2020-SPS-performance-standard.pdf>
- GSA (2021) European GNSS (Galileo) open service: Service definition document. Tech. Rep. Issue 1.2, URL https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.2.pdf
- Gurtner W, Estey L (2006) RINEX: The receiver independent exchange format version 2.11. Tech. rep., URL <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex211.txt>
- IGS-IC (2022) Product filenames in the IGS, Version 2.0. URL https://files.igs.org/pub/resource/guidelines/Guidelines_For_Long_Product_Filenames_in_the_IGS_v2.0.pdf
- Jekeli C, Montenbruck O (2017) Time and reference systems. In: Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer International Publishing, pp 25–58, DOI 10.1007/978-3-319-42928-1.2
- Johnston G, Riddell A, Hausler G (2017) The International GNSS Service. In: Teunissen P, Montenbruck O (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer, chap 33, pp 967–982, DOI 10.1007/978-3-319-42928-1.33
- MoD (2014) “Parametry Zemli 1990” (PZ-90.11) Reference Document. URL https://eng.mil.ru/files/PZ-90.11_final-v8.pdf, Military Topographic Department of the General Staff of Armed Forces of the Russian Federation
- Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A (2015) Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. GPS Solutions 19(2):321–333, DOI 10.1007/s10291-014-0390-8
- Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A (2018) Multi-GNSS signal-in-space range error assessment – methodology and results. Advances in Space Research 61(12):3020–3038, DOI 10.1016/j.asr.2018.03.041
- NGA (2021) Recent update to WGS 84 reference frame and NGA transition to IGS ANTEX. URL [https://earth-info.nga.mil/php/download.php?file=\(U\)WGS84\(G2139\).pdf](https://earth-info.nga.mil/php/download.php?file=(U)WGS84(G2139).pdf)
- Petit G, Luzum B (2010) IERS Conventions (2010). IERS Technical Note 36, Frankfurt am Main
- Rebischung P (2023) [IGSMail-8331] IGS cumulative SINEX solution resumes. URL <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2023/008327.html>
- Seitz M, Angermann D, Bloßfeld M (2017) Geometrische Referenzsysteme. In: Erdmessung und Satellitengeodäsie, Springer Berlin Heidelberg, pp 325–348, DOI 10.1007/978-3-662-47100-5_17
- Steigenberger P, Montenbruck O, Bradke M, Ramatschi M, Hessels U (2022) Evaluation of earth rotation parameters from modernized GNSS navigation messages. GPS Solutions 26(2), DOI 10.1007/s10291-022-01232-4
- Wallace P, Capitaine N (2006) Precession-nutation procedures consistent with IAU 2006 resolutions. Astronomy & Astrophysics 459:981–985, DOI 10.1051/0004-6361:20065897
- Wübbena G, Schmitz M, Warneke A (2019) Geo++ absolute multi frequency GNSS antenna calibration. In: EUREF Analysis Center (AC) Workshop, Warsaw, Poland, URL http://www.geopp.com/pdf/gpp_cal125_euref19_p.pdf
- Zhou S, Liu L, Xu J, Qu W, Zhang H, Yang Y, Hu X, Xia F (2022) BeiDou Coordinate System (BDOS) status and precise transfer. In: 16th Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems, URL <https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2022/ICG16/wgd-09.pdf>