

Der Internationale GPS Service (IGS) und seine Produkte

Urs Hugentobler, Tim Springer, Gerhard Beutler

Astronomisches Institut
Universität Bern
Sidlerstrasse 5
CH-3012 Bern
urs.hugentobler@aiub.unibe.ch

1. Einleitung

In den vergangenen beiden Jahrzehnten begann GPS eine wesentliche Rolle zu spielen für regionale und globale Studien in Geodäsie und Geodynamik. Es wurde in den 1980er Jahren schon klar, dass die Qualität der Satellitenbahnen für vielerlei Anwendungen von zentraler Bedeutung sein würde. Im Hinblick auf eine weitere Ausbreitung und Verfeinerung von GPS-Anwendungen hat sich die wissenschaftliche Gemeinschaft angestrengt, internationale Standards für die GPS-Datenerfassung und -verarbeitung zu fördern sowie ein gemeinsames globales Netz von GPS-Beobachtungsstationen aufzubauen. Wesentlichster Teil dieser Anstrengungen ist der *International GPS Service (IGS)*, der durch die International Association of Geodesy (IAG) 1991 gegründet wurde.

Der IGS geht auf eine Initiative von Prof. I. Mueller zurück, welche an der wissenschaftlichen Versammlung der IAG im August 1989 in Edinburgh lanciert wurde. An der 20. Generalversammlung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik (IUGG) im August 1991 in Wien wurde die Erprobung des Konzeptes empfohlen. Die *1992 IGS Test Campaign* vom 21. Juni bis zum 23. September 1992 ging lückenlos in den *IGS Pilot Service* (1. November 1992 bis 31. Dezember 1993) und schliesslich in den offiziellen IGS ab dem 1. Januar 1994 über.

2. Zielsetzungen und Aufbau des IGS

Hauptaufgabe ist das Bereitstellen von GPS-Daten und der daraus abgeleiteten Produkte zur Unterstützung von geodätischen und geophysikalischen

Forschungsarbeiten. Infolge der enorm wachsenden Zahl von GPS-Anwendungen liegt ein weiteres Ziel von IGS in der Unterstützung von GPS-Projekten, die von staatlichen und kommerziellen Unternehmen initiiert und durchgeführt werden.

Der IGS sammelt, archiviert und verteilt GPS-Beobachtungen, sofern deren Qualität ausreichend erscheint, um dem weiten Anwendungs- und Experimentierbereich zu genügen. Die Beobachtungsdaten werden von IGS selber verwendet, um eine Reihe von Produkten zu generieren und den interessierten Benutzern über das Internet zur Verfügung zu stellen. Die IGS-Produkte sind heute von zentraler Bedeutung zur Verbesserung und Erweiterung des *International Terrestrial Reference Frame (ITRF)*, zur Untersuchung der Verformungen der festen Erde, zur Überwachung der Erdrotation, zur wissenschaftlichen Bahnbestimmung, zur Überwachung der Ionosphäre und zur punktuellen Messung des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre. Der IGS ist vorrangig als wissenschaftliche Dienstleistung zu sehen. Neben der Genauigkeit und Vollständigkeit der IGS-Produkte ist daher auch deren Aktualität und Zuverlässigkeit von zentraler Bedeutung.

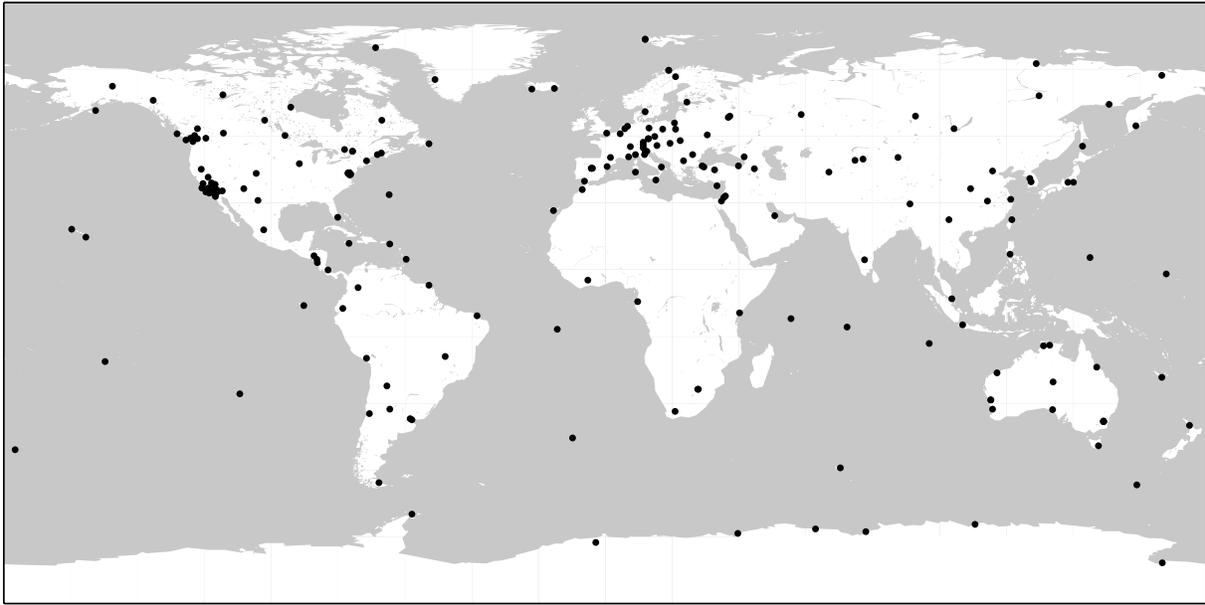
Um seinen Auftrag zu erfüllen, ist der IGS aus einer Reihe von Komponenten zusammengesetzt, einem globalen Netzwerk von über 200 GPS-Empfängern, über einem Dutzend operationeller und regionaler Datenzentren, drei globalen Datenzentren sowie sieben Analysezentren und einer Reihe von sogenannten assoziierten Analysezentren. Das *IGS Central Bureau* befindet sich am Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena. Dieses unterhält u.a. das *Central Bureau Information System (CBIS)* und stellt den Zugang zu den Daten und Produkten des IGS sicher. Ein internationales *Governing Board* („Verwaltungsrat“) überwacht die verschiedenen Funktionen und Komponenten des IGS, setzt dessen Politik fest und trifft strategische Entscheide.

IGS Central Bureau:	
http://igsb.jpl.nasa.gov	CBIS
ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/mail/igsmail	IGS Mail Archiv
ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/mail/igsreport	IGS Reports
ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb	anonymer ftp

Tabelle 1: Verknüpfungen und Adressen für das anonyme FTP zum IGS Central Bureau am JPL, Pasadena, CA, USA.

Ein *internationales Netzwerk* von 236 (Stand am 6. Juni 2000, siehe Figur 1) kontinuierlich arbeitender Zweifrequenz-GPS-Empfänger, installiert in rund 70

Ländern und betrieben von einer Vielzahl von Organisationen, registrieren die GPS-Daten. Sogenannte operationelle Datenzentren sind verantwortlich für den direkten Kontakt mit den Stationen. Sie holen die rohen Empfängerdaten, kontrollieren deren Qualität und verwandeln diese Daten ins Receiver Independent Exchange (RINEX) Format, bevor sie diese an die regionalen oder globalen Datenzentren weiterleiten.



Figur 1: Verteilung der 236 IGS Stationen, welche am 6. Juni 2000 in Betrieb waren.

Die fünf *regionalen IGS-Datenzentren* sammeln und archivieren die Daten von verschiedenen Operationellen Datenzentren. Dort werden auch Daten, welche nicht für die globalen Analysen verwendet werden, abgelegt und für Benutzer bereitgestellt, welche sich für Stationen in einer bestimmten Region interessieren. Eines der Regionalen Datenzentren befindet sich am Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Frankfurt a. M.

Die drei *globalen IGS-Datenzentren* sind die primäre Datenquelle für die IGS-Analysezentren sowie für die allgemeinen Datennutzer. In den Archiven dieser Zentren sind die GPS-RINEX-Dateien für mindestens die letzten hundert Tage on-line verfügbar. Die Daten des sogenannten globalen IGS-Netzes, bestehend aus jenen rund 90 Stationen, deren Beobachtungen an mehreren Auswertezentren verarbeitet werden, sind bei allen globalen IGS-Datenzentren erhältlich.

Globale IGS-Datenzentren:	
CDDIS	Crustal Dynamics Data Information System NASA Goddard Space Flight Center, USA http://cddisa.gsfc.nasa.gov
IGN	Institut Géographique National, Frankreich http://lareg.ensg.ign.fr
SIO	Scripps Institution of Oceanography, CA, USA http://lox.ucsd.edu
Regionale IGS-Datenzentren:	
AUSLIG	Australian Surveying and Land Information Group http://www.auslig.gov.au
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Deutschland http://www.ifag.de/Geodaesie/igs.html
JPL	Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology http://scign.jpl.nasa.gov
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration, USA http://gracie.grdl.noaa.gov/GPS/GPS.html
NRCan	Natural Resources Canada http://geod.emr.ca
IGS-Analysezentren:	
CODE	Center for Orbit Determination in Europe, Bern, Schweiz http://www.aiub.unibe.ch
ESA/ESOC	European Space Agency, European Space Operating Center, Darmstadt, Deutschland http://nng.esoc.esa.de/gps/gps.html
GFZ	Geoforschungszentrum, Potsdam, Deutschland http://www.gfz-potsdam.de/pb1/pg1/IGS/index_IGS.html
JPL	Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, USA http://milhouse.jpl.nasa.gov/eng/jpl_hp2.html http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html
NOAA/NGS	National Oceanic and Atmospheric Administration http://gracie.grdl.noaa.gov/GPS/GPS.html
NRCan	Natural Resources Canada http://geod.emr.ca
SIO	Scripps Institution of Oceanography, CA, USA http://lox.ucsd.edu
USNO	US Naval Observatory, Washington, USA (assoziiertes Analyse- zentrum für Rapid, Ultra Rapid und Predicted IGS Produkte) http://tycho.usno.navy.mil/gps.html

Tabelle 2: Globale und regionale IGS-Datenzentren, Analysezentren.

IGS Analysis Center Coordinator:	
Tim Springer, Astronomisches Institut, Universität Bern, Schweiz	
http://www.aiub.unibe.ch/acc.html	
ftp://ftp.unibe.ch	
/aiub/final_igs	IGS Final (IGS) Produkte
/aiub/prelim_igs	IGS Rapid (IGR) und Predicted (IGP) Orbits
/aiub/ultra_igs	IGS Ultra Rapid (IGU) Orbits (2-mal täglich)

Tabelle 3: Verknüpfungen und Adressen zum IGS ACC.

CBIS	
ftp://igscb.jpl.nasa.gov	
/pub/product/WWW	IGS Produkte(IGS, IGR, IGP)
/pub/product/WWW/ultra	IGS Ultra Rapid (IGU) Produkte
CDDIS	
ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov	
/pub/gps/gpsdata/YYDDD	24-Stunden Beobachtungsfiles
/pub/gps/nrtdata/YYDDD	stündliche 30-sec-Beobachtungsfiles
/pub/gps/products/WWW	IGS Produkte (Bahnen, Uhren, etc.)
IGN	
ftp://igs.ensg.ign.fr	
/pub/igs/data/YYYY/DDD	24-Stunden Beobachtungsfiles
/pub/iigs/nrt/data/YYYY/DD	stündliche 30-sec-Beobachtungsfiles
/pub/igs/products/WWW	IGS Produkte (Bahnen, Uhren, etc.)
SIO	
ftp://lox.ucsd.edu	
/pub/rinex/YYYY/DDD	24-Stunden Beobachtungsfiles
/pub/products/WWW	IGS Produkte (Bahnen, Uhren, etc.)

Tabelle 4: FTP-Adressen und Pfadnamen zu Daten und Produkten am CBIS und an den globalen IGS Datenzentren.

YYDDD	Jahr und Tag im Jahr, z.B. 00158
WWW	GPS Woche, z.B. 1065
WW	Woche im Jahr, z.B. 23
YYYY	vierstellige Jahreszahl, z.B. 2000
YY	zweistellige Jahreszahl, z.B. 00
DDD	Tag im Jahr, z.B. 099

Tabelle 5: IGS-Namenskonventionen in Dateinamen und Datenpfaden.

Sieben *IGS-Analysezentren (ACs)* verarbeiten täglich Daten des globalen Stationsnetzes und generieren ihre Produkte. Drei dieser Analysezentren befinden sich in Europa (GFZ in Potsdam, ESA/ESOC in Darmstadt, CODE in Bern). Eine Reihe von assoziierten IGS-Analysezentren (AACs) spezialisieren sich auf bestimmte Produkte oder deren Kombination (z.B. GPS-Bahnen oder Ionosphärenparameter) oder werten die Daten eines regionalen Stationsnetz aus.

Die GPS-Bahnen, Erdrotationsparameter und Uhrenkorrekturschätzungen der ACs werden vom *Analysis Center Coordinator (ACC)* zu den offiziellen IGS-Produkten kombiniert und ans CBIS verschickt, wo sie allgemein zugänglich sind. Die Funktion des ACC wird seit 1999 von Dr. Tim Springer am Astronomischen Institut der Universität Bern wahrgenommen.

3. Die Produkte des IGS

Zu den offiziellen IGS Produkten gehören:

- präzise Ephemeriden der aktiven GPS-Satelliten,
- Erdrotationsparameter (Polschwankung und Tageslänge),
- Koordinaten und Geschwindigkeiten der Beobachtungsstationen,
- Uhrenkorrekturen für die GPS-Satelliten und IGS-Stationen,
- troposphärische Signalverzögerungswege für die Beobachtungsstationen, sowie
- globale Karten des ionosphärischen Elektronengehaltes.

Diese Produkte sind am IGS CBIS und an den globalen IGS-Datenzentren online verfügbar und können über das Internet abgeholt werden.

3.1. Ephemeriden: Final, Rapid, Predicted, Ultra Rapid

Die Ephemeriden der GPS-Satelliten sind die Kernprodukte des IGS. Der Service stellt die Bahnen den Nutzern für die vielfältigsten Anwendungen zur Verfügung. Die Genauigkeit der Ephemeriden ist so gut, dass es für einen GPS-Anwender keine Vorteile mehr bringt, eigene Bahnen zu rechnen. Der IGS stellt Ephemeriden unterschiedlicher Genauigkeit und definierten Zeiten nach der Beobachtung zur Verfügung (siehe Tabelle 6).

Acht Analysezentren rechnen täglich die Bahnen der Satelliten mit verschiedenen Auswertestrategien und Verarbeitungsprogrammen. Die Resultate der Zentren werden vom Analysis Center Coordinator (ACC) verglichen und

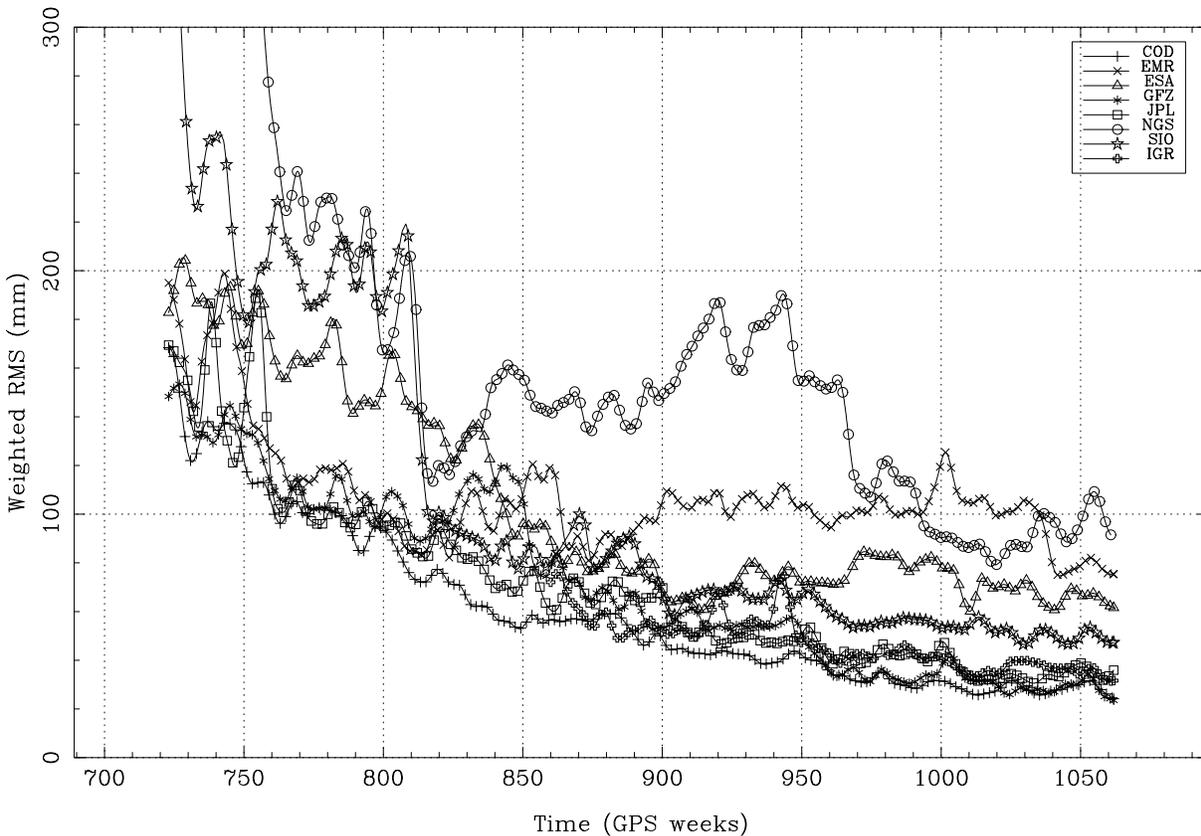
kombiniert. Die kombinierten Resultate werden schliesslich am CBIS und an den Globalen IGS Datenzentren über Internet verfügbar gemacht. Der Vergleich der Resultate der IGS-Auswertezentren garantiert eine hohe Genauigkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit der Produkte. Als positiven Nebeneffekt haben sie einen fortwährenden Wettbewerb zwischen den Analysezentren zur Folge. Ohne diesen dauernden Vergleich wäre die Steigerung der Genauigkeit der Ephemeriden bestimmt langsamer erfolgt. Figur 2 zeigt den gewichteten mittleren Fehler pro Satellitenposition als Mass für die Bahnqualität der IGS Final Orbits als Funktion der Zeit von November 1993 bis Mai 2000 für die sieben Analysezentren. Die Bahnqualität hat sich in diesem Zeitraum von 15–20 cm auf unter 5 cm verbessert.

Der *Final Orbit* ist dasjenige IGS-Produkt, in welches die Analysezentren den grössten Aufwand stecken und für welches sie die ausgefeiltesten Auswertestrategien anwenden. Entsprechend ist das Produkt erst nach zwei Wochen verfügbar. Die Wochenlösungen der einzelnen Zentren werden vierzehn Tage nach Ende der letzten einflussenden Beobachtung kombiniert und für die Nutzer bereitgelegt. Die Genauigkeit der Ephemeriden beträgt etwa 5 cm (mittlerer Fehler pro Satellitenkoordinate) und genügt den höchsten Ansprüchen.

Die Genauigkeit der IGS-Bahnen wird bestätigt durch Laser (SLR) Beobachtungen jener zweier mit Laser-Retroreflektoren bestückten GPS-Satelliten. Die Laser-Residuen zeigen bei einer Streuung von 5.5 cm einen Offset zwischen den beiden unabhängigen Beobachtungstechniken von 5 cm relativ zu den mit IGS-Bahnen berechneten Distanzen (siehe Figur 3, Springer 1999). Dieser systematische Unterschied ist momentan Gegenstand von Untersuchungen.

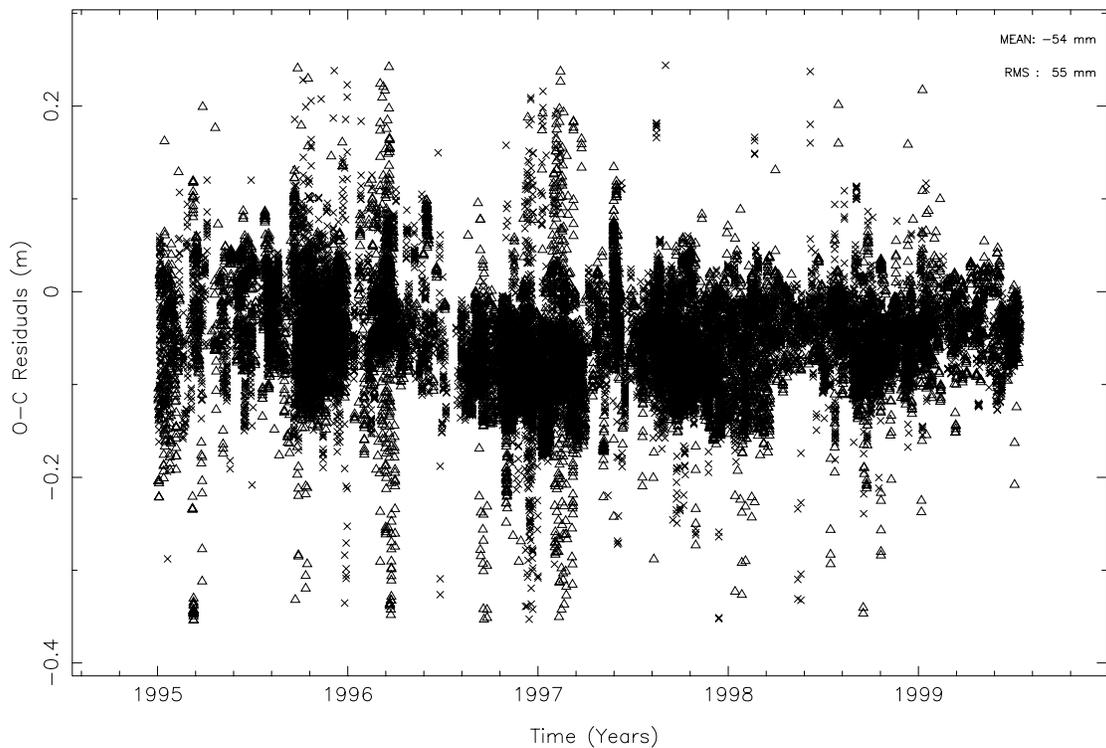
	IGS Final	IGS Rapid	IGS Predicted
Verfügbarkeit:	nach 2 Wochen	nach 17 Stunden	in Echtzeit
Genauigkeiten:			
- Ephemeriden	5 cm	10 cm	50 cm
- Uhren	0.3 ns	0.5 ns	150 ns *)
- Polkoordinaten	0.1 mas	0.2 mas	–
- Polkoordinatendrifts	0.2 mas/Tag	0.4 mas/Tag	–
- Tageslänge	30 μ s/Tag	60 μ s/Tag	–

Tabelle 6: Verfügbarkeit und Genauigkeit der verschiedenen IGS Ephemeriden-, Uhren- und Erdrotationsprodukte. *) 150 ns ist die durch SA beschränkte Genauigkeit. Ohne SA sollte eine Genauigkeit von 10 ns erreichbar sein.



Figur 2: Gewichteter mittlerer Fehler pro Satellitenposition für die IGS Final Orbits als Funktion der Zeit für die sieben Analysezentren. Als Vergleich ist auch der gewichtete RMS für den IGS Rapid Orbit eingezeichnet. Die einzelnen Kurven wurden mit einem gauss'schen Filter geglättet.

Schon 17 Stunden nach Ende des Beobachtungstages sind die *IGS Rapid Orbits (IGR)* verfügbar. Typischerweise treffen rund 40% der Beobachtungsdaten bereits innerhalb einer Stunde nach Mitternacht UT bei den globalen IGS Datenzentren ein, 75% aller Beobachtungen sind 6 Stunden nach Mitternacht greifbar. Die Rohdaten werden von den Analysezentren bei den globalen und regionalen Datenzentren abgeholt, und sobald genügend Stationsdaten verfügbar sind, werden die Auswertprogramme automatisch gestartet. Da die Resultate bis nachmittags um 16 Uhr UT abgeliefert sein müssen, werden weniger Stationen verarbeitet als bei der Berechnung der Final Orbits, und bei den Auswertestrategien werden bisweilen „Konzessionen“ gemacht, um die Verarbeitung zu beschleunigen. Die Genauigkeit der IGS Rapid Orbits ist trotzdem schon vergleichbar mit jener der IGS Final Orbits.



Figur 3: Distanz-Residuen der SLR-Beobachtungen zu den GPS-Satelliten PRN 5 (Kreuze) und PRN 6 (Dreiecke).

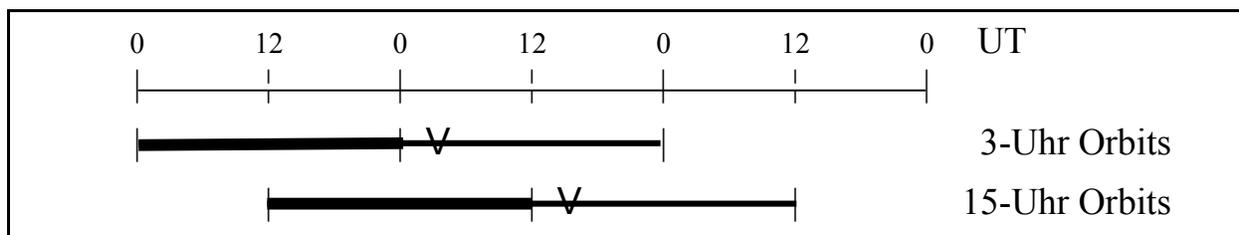
Weil für viele Anwendungen die Ephemeriden in Echtzeit verfügbar sein müssen, werden die IGS Rapid Orbits verwendet, um die *IGS Predicted Orbits* zu generieren. Die Extrapolationszeit beträgt zwei Tage. Die Ephemeriden werden um 23 Uhr UT des auf die letzte Beobachtungsepoche folgenden Tages kombiniert und am CBIS und bei den globalen Datenzentren bereitgestellt. Sie überspannen den eine Stunde später beginnenden Tag. Ihr mittleres Alter beträgt somit 36 Stunden.

Die Genauigkeit der IGS Predicted Orbits liegt zwischen 50 und 100 cm und ist damit deutlich schlechter als jene der IGS Rapid Orbits. Für die relativ schlechte Qualität der Rapid Orbits sind einzelne Satelliten verantwortlich, deren Bahnen schlecht modellierbar sind, z.B. wegen Manövern, Schattendurchgängen, und Problemen mit der Lagekontrolle bei älteren Satelliten. Die IGS-Ephemeriden enthalten Information („*accuracy codes*“) über die erwartete Qualität der Bahnen (mehr dazu im nächsten Abschnitt).

Um das Alter der prädizierten Bahnen zu reduzieren, hat der IGS im März 2000 begonnen, sogenannte *IGS Ultra Rapid Orbits (IGU)* zu generieren. Diese sind, wie die IGS Rapid Orbits, für Echtzeitanwendungen erhältlich, werden jedoch

zweimal täglich erzeugt und sind jeweils ab 3 UT und 15 UT verfügbar. Die Bahnen beruhen u.a. auf Daten der IGS-Stationen, die ihre Beobachtungen stündlich an die Datenzentren weiterleiten. Bereits liefern 40 bis 50 global verteilte Stationen stündliche Datenfiles ab.

Anders als die anderen IGS-Ephemeridenfiles überspannen die IGS Ultra Rapid Orbits nicht 24 sondern 48 Stunden (siehe Figur 4). Dabei enthalten die ersten 24 Stunden Beobachtungen aus den stündlichen IGS Datenfiles, die nächsten 24 Stunden sind extrapoliert. Mit den IGS Ultra Rapid Orbits verkürzt sich das mittlere Alter der Prädiktionen von 36 (IGS Predicted Orbits) auf 9 Stunden, was ihre Qualität entscheidend verbessert.



Figur 4: Überspanntes Zeitintervall für IGS Ultra Rapid Orbit Files, welche ab 15 UT resp. 3. UT erhältlich sind (Symbol V). In die ersten 24 Stunden sind Beobachtungen des IGS Subnetzes eingeflossen, welches stündliche Daten liefern.

Die IGS Ultra Rapid Orbits befinden sich noch in einem experimentellen Stadium, werden jedoch bald zu einem offiziellen IGS-Produkt werden. Die Analysezentren sind daran, ihre Auswertestrategien und Algorithmen für das neue Produkt zu optimieren und den Automatisierungsgrad der Verarbeitung weiter zu erhöhen. In den Monaten seit dem Beginn der Bahnvergleiche konnte eine beträchtliche Qualitätsverbesserung der Ultra Rapid Orbits beobachtet werden. Sie beträgt im Sommer 2000 rund 35 cm (RMS) für das prädizierte Zeitintervall. Über kurz oder lang werden die IGS Ultra Rapid Orbits die IGS Predicted Orbits ablösen.

Zusammen mit den Bahnen werden auch die *Uhrenkorrekturen* für die Satelliten berechnet und zur Verfügung gestellt. Die Genauigkeit der IGS Final Clocks beträgt 0.3 ns, jene der IGS Rapid Clocks 0.5 ns. Seit die sogenannte Selective Availability am 2. Mai 2000 ausgeschaltet wurde, wurde die Genauigkeit der Broadcastuhren von rund 80 ns auf 8 ns gesteigert. Die Genauigkeit der Uhren kann nun unter Verwendung des typischen Verhaltens einer Cäsiumuhr prädiziert werden. Für IGS Predicted Clocks und die IGS Ultra Rapid Clocks

sollte es nun möglich sein, die Genauigkeit der Uhren von rund 150 ns auf etwa 10 ns zu senken. Entsprechende Untersuchungen sind im Gange. Die IGS Uhrkorrekturen von Satelliten und IGS-Stationen sind in naher Zukunft auch im RINEX-Clock-Format verfügbar.

In der IGS Final- und Rapid-Lösung werden *Erdrotationsparameter* bestimmt. Die Genauigkeit der Parameter beträgt 0.1 mas resp. 0.2 mas für die Polkoordinaten sowie 30 μ s/Tag resp. 60 μ s/Tag für die Tageslänge in der Final- resp. Rapid-Lösung. Bahnen und Erdrotationsparameter müssen als Einheit betrachtet werden. Benutzer von IGS-Bahnen sollten die aus derselben Lösung stammenden Erdrotationsparameter verwenden, wenn sie höchste Genauigkeit anstreben.

3.2. Genauigkeitscodes in den Ephemeridendateien

Die IGS-Ephemeridendateien enthalten Information („*accuracy codes*“) über die erwartete Qualität der Bahnen. Diese beruhen auf der Übereinstimmung resp. Nichtübereinstimmung der Bahnen, welche von den einzelnen Analysezentren erzeugt wurden. Im wesentlichen gibt der Genauigkeitscode den Logarithmus zur Basis 2 des mittleren Fehlers pro Satellitenkoordinate in Millimetern an, wie er aus der Bahnkombination resultiert. Die Formel „2 hoch Genauigkeitscode“ gibt somit die Bahngenauigkeit in Millimetern an. Nutzer sollten Satellitenbahnen mit hohen Genauigkeitscodewerten entsprechend schwach gewichten oder nicht verwenden. Ebenfalls nicht verwendet werden sollten Bahnen deren Genauigkeitscode gleich Null gesetzt wurde. Diese Bahnen wurden nur von einem Analysezentrum abgegeben und sind damit nicht überprüfbar. In Tabelle 7 sind typische Angaben über die Verteilung der Genauigkeitscodes in den Dateien der verschiedenen IGS Ephemeridenprodukten angegeben.

	Typische Codes	Schlechter Code (Richtwert)	Prozentsatz schlechter Codes	Prozentsatz nicht verfügbarer Satelliten
Final	4-5	> 7	0.5 %	0.0 %
Rapid	4-6	> 8	0.5 %	0.5 %
Predicted	6-9	> 9	8 %	6 %
Ultra Rapid	6-8	> 9	3 %	2 %

Tabelle 7: Statistik der Genauigkeitscodes („*accuracy codes*“) in den Dateien der verschiedenen IGS Ephemeriden.

Die Genauigkeitscodes sind besonders wichtig für die prädierten Bahnen. In diese Codes fließt auch Information über das Verhalten der Satelliten während der letzten Tage ein. Leider kann trotzdem die Bahnqualität nicht mit Sicherheit prädiert werden, so dass hin und wieder ein Satellit mit gutem Genauigkeitscode eine ‚schlechte‘ Bahn haben kann.

3.3 Koordinaten und Geschwindigkeiten der Stationen

Der IGS arbeitet eng mit dem *International Earth Rotation Service (IERS)* zusammen. Die im Rahmen von IGS generierten GPS-Daten und Produkte leisten heute neben VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging) und DORIS (Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite) einen wesentlichen Beitrag zur Definition des International Terrestrial Reference Frames (ITRF), der Polbewegung und der Tageslängenvariationen.

Zu den Produkten des IGS gehören Koordinaten und Geschwindigkeiten der IGS-Stationen. Die Analysezentren stellen ihre Lösungen der Koordinaten und Geschwindigkeiten der IGS-Stationen dem IERS zur Verfügung, der diese zusammen mit jenen der anderen drei Beobachtungstechniken zu einer Gesamtlösung kombiniert, die dann eine Realisierung des ITRF bildet. Der IGS verwendet diese ITRF-Realisierungen seinerseits um Koordinaten und Geschwindigkeiten von Stationen und Satelliten in einem homogenen Koordinatensystem auszudrücken. Eine Liste der von IGS verwendeten ITRF-Realisierungen findet sich in Tabelle 8.

Realisierung	Start	Ende
ITRF91	Start des IGS	1. Januar 1994
ITRF92	2. Januar 1994	31. Dezember 1994
ITRF93	1. Januar 1995	29. Juni 1996
ITRF94	30. Juni 1996	28. Februar 1998
ITRF96	1. März 1998	31. Juli 1999
ITRF97	1. August 1999	—

Tabelle 8: Von IGS verwendete ITRF Realisierungen.

Seit März 1999 stellt die IGS Reference Frame Working Group wöchentlich Koordinatenlösungen im sogenannten Software Independent Exchange (SINEX) Format bereit. Zusätzlich wird eine SINEX Datei generiert, welche auf den kumulierten Lösungen seit 1996 beruht und die auch die Stationsgeschwin-

digkeiten enthält. Die Koordinaten und Geschwindigkeiten der über 170 verwendeten IGS-Stationen realisieren ein sehr homogenes, allein auf GPS-Daten beruhendes und mit ITRF alingiertes Referenzsystem. Die SINEX Dateien sind am CDDIS erhältlich (siehe Tabelle 9).

CDDIS	ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/WWW/	
	IGSYYPWW.snz	kumulierte Koordinatenlösung
	igsYYPWWW.snz	wöchentliche Koordinatenlösung

Tabelle 9: IGS Koordinaten-Wochenlösungen.

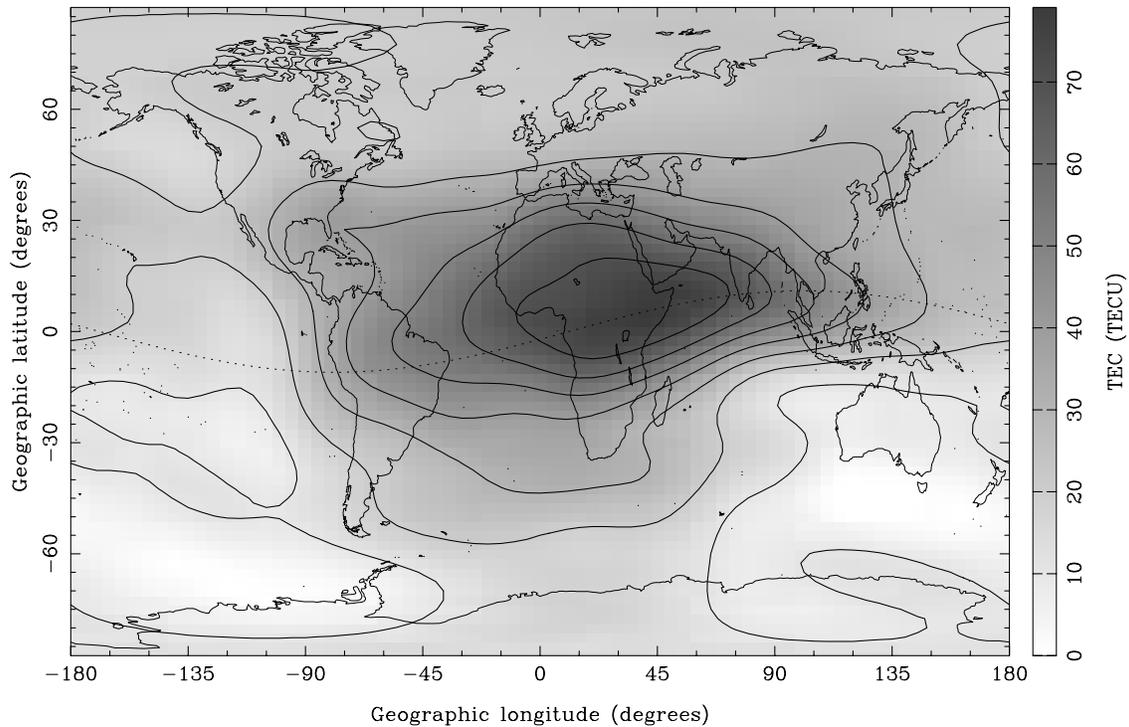
3.4. Troposphäre und Ionosphäre

Seit 1998 sind für über 150 IGS-Stationen troposphärische Zenit-Laufzeitkorrekturen in zweistündlichem Intervall erhältlich. Die Resultate der einzelnen Analysezentren werden am Geoforschungszentrum in Potsdam gesammelt, verglichen und zu Wochendateien kombiniert. Diese sind mit einem Verzug von rund drei Wochen auf die Beobachtungen CDDIS verfügbar (siehe Tabelle 10). Die Standardabweichung der Zenitkorrekturen beträgt für die meisten Stationen 2–5 mm.

Globale Ionosphärenkarten werden von fünf Analysezentren gerechnet (siehe Figur 5). Neben den IGS-Zentren CODE, EMR, ESA und JPL ist auch die Polytechnische Universität von Katalonien (UPC) in Barcelona beteiligt. Verglichen werden die Karten an der European Space Agency (ESA) in Darmstadt. Die Karten der einzelnen Analysezentren können am CDDIS als Dateien im Ionosphere Exchange (IONEX) Format abgeholt werden (siehe Tabelle 10). Die Dateien enthalten für jeden Tag zwölf Karten mit dem globalen totalen ionosphärischen Elektronengehalt (TEC) in zweistündlichen Intervallen. Zusätzlich enthalten die Dateien für jeden Tag satellitenspezifische Differenzen zwischen den P-Codes der beiden Frequenzen.

CDDIS	ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/WWW/trop/	
	statWWW.zpd	troposphärische Zenitdelays für Station <i>stat</i>
	ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/ionex/YYYY/DDD/cengDDD0.00i	IONEX Datei von Auswertezentrum <i>cen</i>

Tabelle 10: IGS Troposphären-Dateien und globale Ionosphärenkarten.

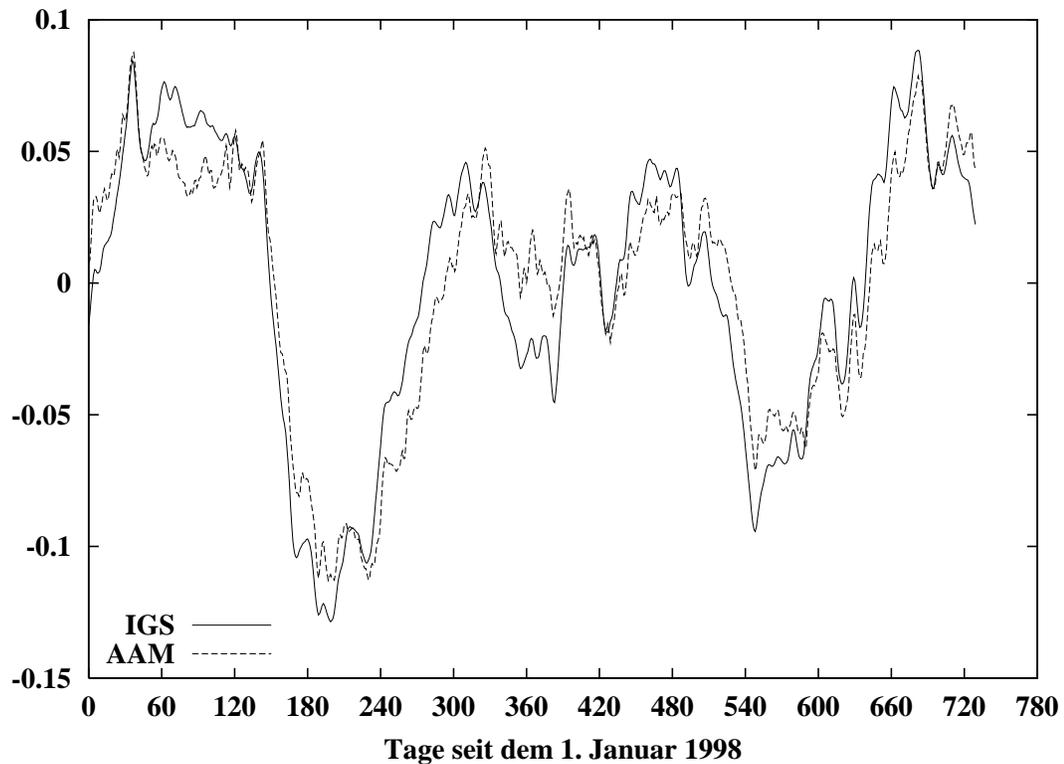


Figur 5: Ionosphärenkarte von CODE für den 22. Juni 2000, 13 Uhr UT.

4. Ein weiterführendes Resultat: Der Atmosphärische Drehimpuls

Der Drehimpuls der festen Erde kann aus der Polbewegung und der Tageslängenvariationen berechnet werden. Aus Variationen dieses Drehimpulses kann auf Änderungen des Trägheitsmomentes der Erde und Umschichtungen des Drehimpulses zwischen dem Erdkörper einerseits und Atmosphäre und Ozeanen andererseits geschlossen werden. Für die Variationen des Trägheitsmomentes der Erde kommen Gezeitendeformationen sowie Masseumlagerungen in Atmosphäre und Ozeanen in Frage.

Die Meteorologen rechnen den atmosphärischen Drehimpuls mit Hilfe ihrer Atmosphärenmodellen aus Masseumschichtungen (Druck) und Geschwindigkeiten (Winde). Dieser atmosphärische Drehimpuls kann verglichen werden mit dem aus den Erdrotationsparametern gerechneten Drehimpuls, wie er von dem IGS aus GPS-Beobachtungen bestimmt wird. Figur 6 zeigt die Variationen der dritten Komponente der Drehimpulsfunktion χ_3 über zwei Jahre, wie sie durch die beiden Methoden bestimmt werden. Von den GPS-Resultaten wurde vorgängig die durch die Gezeiten verursachten Variationen subtrahiert. Die Zeitserie des atmosphärische Drehimpulses wurde von den National Centers for Environmental Prediction (NCEP), USA, übernommen.



Figur 6: Axiale Drehimpulsfunktion χ_3 (in dimensionslosen Einheiten von 10^{-7}) der Erde, bestimmt aus GPS-Messungen und aus atmosphärischen Daten (ein linearer Trend und die Gezeiteneffekte mit Perioden bis 35 Tagen wurden entfernt).

Die Übereinstimmung der beiden Zeitreihen ist eindrucklich, der Korrelationskoeffizient beträgt 0.933. Deutlich erkennbar ist eine jahreszeitliche Schwankung der beiden Reihen. Bemerkenswert ist, dass die Variationen des atmosphärischen Drehimpulses hauptsächlich durch Winde, d.h. atmosphärische Zirkulationssysteme, verursacht werden und nicht durch Drehmomentänderungen durch Masseumschichtungen. Interessant ist auch, dass die Variationen des Drehimpulses des Erdkörpers hauptsächlich durch die Atmosphäre und nicht durch die Ozeane verursacht scheinen (sieht man von den Gezeiten ab).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der IGS war in den vergangenen Jahren sehr erfolgreich. Die IGS-Produkte genügen höchsten Ansprüchen und eignen sich für eine ganze Reihe von Anwendungen in Forschung und Vermessung. Für die Rapid- und Final-

Produkte bewegt sich die Genauigkeit der Ephemeriden im Bereich weniger Zentimeter. Demnächst wird ein neues Produkt, der IGS Ultra Rapid Orbit offiziell erhältlich sein. Mit den zweimal täglich bereitgestellten Ephemeriden verbessert sich die Bahnprognose für die GPS-Satelliten signifikant.

Weitere IGS-Produkte sind in der Erprobungsphase oder werden entwickelt. Hierzu gehören die kombinierte Auswertung von GPS- und GLONASS-Beobachtungen im Rahmen des IGLOS-Pilotprojektes. Die IGS-Arbeitsgruppe für die Ionosphäre bereitet die Kombination der Ionosphärenkarten der einzelnen Analysezentren vor. Ein Projekt zum hochpräzisen Zeit- und Frequenzvergleich ist in Vorbereitung in Zusammenarbeit mit dem Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Schliesslich wendet sich der IGS auch der Bahnbestimmung von tieffliegenden, mit GPS-Empfängern ausgestatteten Satelliten zu, um wissenschaftliche Missionen zu unterstützen, welche z.B. zur präzisen Vermessung des Schwerefeldes der Erde oder zur Erfassung von Temperaturprofilen in der Erdatmosphäre geplant sind.

Referenzen

- Beutler, G., M. Rothacher, T. Springer, J. Kouba, R. E. Neilan, 1999: The International GPS Service (IGS). An Interdisciplinary Service in Support of Earth Sciences, *Adv. in Space Research*, Vol. 23, No. 4, 631–653.
- Beutler, G., I. Mueller, R. E. Neilan, R. Weber, 1994: IGS – Der Internationale GPS-Dienst für Geodynamik, *Zeitschrift für Vermessungswesen*, Jahrgang 119, Heft 5, Mai 1994.
- Gowey, K. et al. (Eds.): IGS Technical Reports 1998, IGS Central Bureau, JPL, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA.
- IGS Annual Report, 1998, IGS Central Bureau, JPL, Pasadena, CA, USA.
- IGS Central Bureau Information System, <http://igsb.jpl.nasa.gov>.
- Rothacher, M., 1997: Die Aktivitäten des Rechenzentrums CODE im Rahmen des IGS, Beitrag zum 46. DVW-Seminar, Frankfurt am Main, 1997.
- Schaer, S., 1999: Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere using the Global Positioning System, *Geodätische-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, Vol. 59, Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich.
- Springer, T., 1999: Modeling and Validating Orbits and Clocks Using the GPS, Ph.D. Thesis, Druckerei der Universität Bern, Bern.